



Antti Nurmikolu, Pauli Kolisoja

Sepelinpuhdistuksen vaikutukset raidesepelin ominaisuuksiin

Antti Nurmikolu, Pauli Kolisoja

Sepelinpuhdistuksen vaikutukset raidesepelin ominaisuuksiin

Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 11/2010

Liikennevirasto
Helsinki 2010

Kannen kuvat: Antti Nurmikolu

ISSN-L 1798-6656
ISSN 1798-6656
ISBN 978-952-255-524-3

Verkkojulkaisu pdf (www.liikennevirasto.fi)

ISSN-L 1798-6656
ISSN 1798-6664
ISBN 978-952-255-525-0

Edita Prima Oy
Helsinki 2010

Julkaisua myy/saatavana
Edita (asiakaspalvelu.prima@edita.fi)
Faksi 020 450 2470
Puhelin 020 450 011

Liikennevirasto
PL 33
00521 HELSINKI
Puhelin 020 637 373

Antti Nurmikolu ja Pauli Kolisoja: Sepelinpuhdistuksen vaikutukset raideseppelin ominaisuuksiin. Liikennevirasto, rautatieosasto. Helsinki 2010. Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 11/2010. 64 sivua ja 3 liitettä. ISSN-L 1798-6656, ISSN 1798-6656, ISBN 978-952-255-524-3, ISSN 1798-6664 (pdf), ISBN 978-952-255-525-0 (pdf).

Avainsanat: raideseppeli, tukikerros, hienoneminen, sepelinpuhdistus, seulonta, rakeisuus, lujuus, muodonmuutos, kolmiaksaalikoe

Tiivistelmä

Sepelinpuhdistus on toimenpide, johon turvaudutaan, kun tukikerroksen ominaisuudet ovat heikentyneet tasolle, jolla raidetta ei enää kyetä pitämään peruskunnossapidolla halutussa asemassa. Seulontakoneella tukikerroksesta poistetaan hienontunut kiviaines ja palautetaan karkearakeiset partikkelit takaisin rataan. Lopuksi poistetun hienorakeisen aineksen tilalle lisätään uutta karkearakeista raideseppiä. Tässä työssä tarkasteltiin sepelinpuhdistuksen alaisilla eri rataosilla tehtyihin näyttөөottoihin ja laboratoriotutkimuksiin perustuen tukikerroksen rakeisuutta sekä raideseppelin lujuus- ja muodonmuutosominaisuuksia erityisesti sepelinpuhdistuksen vaikutusten näkökulmasta.

Puhdistettavien tukikerrosten rakeisuus vaihtelee paikallisesti huomattavasti, mistä syystä myös rataan palautuvan sepelin määrä ja rakeisuus vaihtelevat. Rakeisuus vaihtelee myös tukikerrospoikkileikkauksen eri osissa. Rataan palautuvan sepelin määrää ja täydennyssepelin tarvetta voidaan työssä havaitun yhteyden perusteella arvioida tukikerroksesta ennen puhdistusta määritetyistä rakeisuusluvuista.

Rakeisuuden ja rakeiden kuluneisuuden vaikutusta tarkasteltiin mittavassa syklisessä kolmiaksaalikoesarjassa, jonka tuloksia verrattiin myös kirjallisuudessa esitettyihin havaintoihin. Raideseppelin *palautuvan* muodonmuutuskäyttäytymisen osalta kolmiaksaalikokeissa havaittiin systemaattisesti, että materiaalin jäykkyyttä kuvaava resilient-moduuli pienenee aluksi nopeasti rakeisuusluvun kasvaessa, mutta rakeisuusluvun edelleen lisääntyessä resilient-moduulin alentuminen hidastuu. Uuden karkearakeisen sepelin resilient-moduuli oli yli kaksinkertainen verrattuna heikoimpaan tarkasteltuun hylkyseppeliin. *Pysyvien* muodonmuutosten osalta erot kolmiaksaalikokeissa olivat selvästi epämääräisempiä. Tähän saattoi vaikuttaa kolmiaksaalikokeen muuttumattomaan kuormitusluvuun liittyvät puutteet liikkuvan pyöräkuorman simuloinnissa.

Rataan palautettujen pyörästyneiden rakeiden muodostaman materiaalin jäykkyys ei ollut ilman täydentävää uutta terävasärmäistä materiaalia oleellisesti parempi kuin hienontuneella tukikerrosmateriaalilla ennen sepelinpuhdistusta. Tämä ilmentää uuden terävasärmäisen sepelin roolin tärkeyttä erityisesti suuremmilla akselipainoilla. Lujan täydennyssepelin ei voitu laboratoriossa tehdyissä micro-Deval- ja Los Angeles-testeissä havaita systemaattisesti kiihdyttävän lujuudeltaan heikomman rataan palautetun kiviaineksen hienonemista. Kolmiaksaalikokeissa havaitun sellipaineen suuren merkityksen perusteella kirjallisuudessa esitetyillä tavoilla tehtävä tukikerroksen vaakajännitystilan lisääminen saattaa tarjota merkittäviä avaimia muodonmuutosten pienentämiseen tai vastaavasti akselikuorman korottamiseen. Näin on etenkin siitä syystä, että kokeissa saadut viitteet materiaalivalinnoilla saavutettavissa olevista eduista eivät vaikuttaneet dramaattisilta.

Antti Nurmikolu och Pauli Kolisoja: Effekterna av ballastrening på spårmakadamens egenskaper. Trafikverket, järnvägsavdelningen. Helsingfors 2010. Trafikverkets undersökningar och utredningar 11/2010. 64 sidor och 3 bilagor. ISSN-L 1798-6656, ISSN 1798-6656, ISBN 978-952-255-524-3, ISSN 1798-6664 (pdf), ISBN 978-952-255-525-0 (pdf).

Nyckelord: ballast, spårmakadam, pulverisering, ballastrening, siktningsmaskin, kornighet, hållfasthet, deformation, triaxialförsök

Sammandrag

Ballastrening är en åtgärd som utnyttjas då ballastlagrets egenskaper har försämrats till en nivå där spåret inte längre kan hållas i önskad position genom grundunderhållet. En siktningsmaskin används för att avlägsna det finfördelade stenämnet från ballastlagret och återföra de grovkorniga partiklarna till banan. Slutligen tillsätts ny, grovkornig spårmakadam för att ersätta det avlägsnade finkorniga materialet. I undersökningen granskades ballastlagrets kornighet samt spårmakadamens hållfasthets- och deformationsegenskaper särskilt ur ett perspektiv som beaktar ballastreningens effekter. Detta gjordes genom provtagning och laboratorieförsök på banavsnitt som är underställda ballastrening.

De rengjorda ballastskiktens kornighet har avsevärda lokala variationer, varför också mängden och kornigheten på det material som återförs till banan varierar. Kornigheten varierar också mellan de olika delarna i ballastlagrets tvärsnitt. I undersökningen observerades att ett kornighetsindex som fastställs från ballastlagret före reningen kan användas för att uppskatta mängden makadam som återförs till banan och behovet av kompletterande makadam.

Effekterna av kornigheten och hur sliten makadamen är undersöktes i en omfattande serie av cykliska triaxialförsök och resultaten jämfördes också mot observationer som presenteras i litteraturen. För spårmakadamens *reversibla* deformationsbeteende noterades i triaxialförsöken systematiskt att resilient-modulen som beskriver ämnets styvhet först minskar snabbt då kornighetsindexet växer, men då kornighetsindexet fortsätter att växa avmattas tillväxten av resilient-modulen. Den nya grovkorniga makadamens resilient-modul var över dubbelt så stor som för den sämsta betraktade makadamen som kasserades. För de *irreversibla* deformationerna var skillnaderna i triaxialförsöken betydligt mer diffusa. Detta kunde bero av brister i simulering av rörlig hjullast i triaxialförsökets konstanta belastningsriktning.

Styvheten på det material som utgjordes av avrundade korn som återförts till banan var inte märkbart bättre än den finfördelade spårmakadamen före ballastrening om materialet inte kompletterats med nytt material med skarpa kanter. Detta beskriver den nya, vasskantiga makadamens roll särskilt vid större axellaster. I laboratoriet kunde det med micro-Deval- och Los Angeles-försök inte påvisas att den hårda kompletterande makadamen systematiskt skulle försnabba nedbrytningen av det återförda, svagare stenmaterialet. I triaxialförsöken noterades att celltrycket hade en stor betydelse, vilket innebär att man kunde dra stor nytta av att öka den vågräta spänningen i ballastlagret enligt metoder som presenteras i litteraturen. Följaktligen kunde deformationerna minskas eller så kunde axellasten ökas i motsvarande grad. Så är det särskilt av den orsaken att de fördelar man kunde uppnå med olika materialval enligt försöken inte verkade vara dramatiska.

Antti Nurmikolu ja Pauli Kolisoja: Effects of ballast cleaning on the properties of railway ballast. Finnish Transport Agency, Railway Department. Helsinki 2010. Research reports of the Finnish Transport Agency 11/2010. 64 pages and 3 appendices. ISSN-L 1798-6656, ISSN 1798-6656, ISBN 978-952-255-524-3, ISSN 1798-6664 (pdf), ISBN 978-952-255-525-0 (pdf).

Keywords: railway ballast, fouling, degradation, ballast cleaning, grading, ballast strength, deformation, triaxial test

Abstract

Ballast cleaning is required when the properties of the ballast bed have degraded to such a degree that the desired position of the track cannot be maintained by tamping. It is done with a ballast cleaning apparatus which removes the fine-grained (fouled) ballast material and returns the coarse-grained particles into the track. Finally, new coarse-grained ballast is added to replace the removed fouled ballast. This study examines the grading and deformation properties of ballast materials especially from the point of view of the impact of ballast cleaning on the basis of sampling and laboratory analysis of samples.

The grading of the ballast beds to be cleaned varies considerably by location, which also causes variations in the proportion of returnable ballast and its grading. Grading varies also by areas of the ballast bed cross section. The proportion of returnable ballast material and the need for supplementary ballast can be evaluated from the ballast samples taken before cleaning based on the linkage discovered during this study.

The effects of grading and wear of particles (roundness) were examined in an extensive cyclic triaxial test series, whose results were then compared to the findings presented in literature. From the viewpoint of *recoverable* deformation behaviour, the systematic finding was that the resilient modulus, which depicts the stiffness of the material, initially decreases rapidly as the clean, coarse-grained ballast gets more fine-grained, but the reduction in stiffness slows down as the material becomes highly fouled. The resilient modulus of new coarse-grained ballast was more than twofold compared to the weakest waste ballast. In the case of *permanent* deformations, the differences in triaxial tests were clearly less definite. This might be due to the deficiencies of the triaxial test in relation to constant loading direction in the simulation of a moving wheel load.

The stiffness of the material composed only of rounded particles returned to the track was not essentially higher than that of the highly fouled ballast before cleaning. This demonstrates the importance of new, sharp-edged particles as supplementary ballast especially with higher axle loads. In the laboratory-scale micro-Deval and Los Angeles tests, the strong supplementary ballast was not found to speed up the degradation (fouling) of weaker ballast material.

The great significance of confining pressure indicated by the triaxial tests suggests that certain practical solutions aimed at increasing the lateral stresses of the ballast bed presented in literature may essentially help decrease deformations or increase axle loads. This is an issue of high interest especially since the triaxial tests implied that the advantages obtainable through material choices are not very dramatic.

Esipuhe

Tämä tukikerroksen puhdistuksen vaikutuksia kenttä-, laboratorio- ja kirjallisuustutkimuksena käsittelevä työ tehtiin Liikenneviraston toimeksiannosta Tampereen teknillisen yliopiston Maa- ja pohjarakenteiden yksikössä.

Raportin laativat tekn. tri Antti Nurmikolu ja professori Pauli Kolisoja Tampereen teknillisestä yliopistosta. Työn ohjaajina tilaajan puolelta toimivat aluepäällikkö Erkki Mäkelä ja teknisen yksikön päällikkö Matti Levomäki.

Helsingissä kesäkuussa 2010

Liikennevirasto
Rautatieosasto

Sisällysluettelo

1	JOHDANTO	8
2	RAIDESEPELIN RAKEISUUS SEPELINPUHDISTUKSESSA.....	9
2.1	Rakeisuustarkastelujen yleiskuvaus ja näytteenotto.....	9
2.2	Tukikerros ennen sepelinpuhdistusta.....	10
2.3	Rataan palautuva sepeli	12
2.4	Hylkysepeli.....	15
2.5	Tukikerros sepelinpuhdistuksen jälkeen	17
3	TÄYDENNYSSPELIN JA RATAAN PALAUTETUN SEPELIN SEOS	19
3.1	Tutkimusosion yleiskuvaus.....	19
3.2	Täydennyssepin sijoittuminen tukikerrokseen	19
3.3	Lujuudeltaan erilaisten kiviainesten seoksen jauhautuminen	21
4	SEPELIN MUODONMUUTOSOMINAISUUDET KOLMIAKSIAALIKOKEISSA.....	24
4.1	Kolmiaksiaalikoetarkastelujen yleiskuvaus.....	24
4.2	Näyttemateriaalit	24
4.3	Kolmiaksiaalikoejärjestely	27
4.4	Tulosten tarkastelu ja kokeiden vertailuryhmät	31
4.5	Tulokset: palautuvat muodonmuutokset.....	33
4.5.1	Resilient-moduulin laskenta	33
4.5.2	Resilient-moduulimäärityksen toistettavuus raidesepelessä.....	37
4.5.3	Rakeisuuden vaikutus resilient-moduuliin.....	37
4.5.4	Rakeiden kuluneisuuden vaikutus resilient-moduuliin.....	41
4.5.5	Lähdekiviaineksen vaikutus resilient-moduuliin.....	41
4.5.6	Resilient-moduulit pitkissä koesarjoissa	43
4.6	Tulokset: pysyvät muodonmuutokset	43
4.6.1	Pysyvien muodonmuutosten tarkasteluperiaate	43
4.6.2	Jännitystilan vaikutus pysyviin muodonmuutoksiin	46
4.6.3	Havainnot materiaalitekijöiden vaikutuksesta pysyviin muodonmuutoksiin.....	47
4.7	Raidesepepin kolmiaksiaalikoetarkasteluja kirjallisuudessa	51
4.7.1	Periaatteellisia tarkasteluja	51
4.7.2	Käytännön sovellutuksia lähellä olevia tarkasteluja	55
5	PÄÄTELMÄT JA JATKOTUTKIMUSTARPEET	58
5.1	Yleiset huomiot sepelinpuhdistuksesta ja kirjallisuudesta	58
5.2	Tukikerroksen rakeisuus sepelinpuhdistuksen eri vaiheissa.....	59
5.3	Muodonmuutosominaisuudet	60
	KIRJALLISUUSVIITTEET	62
	LIITTEET	
Liite A	Rakeisuustutkimusten yhteenveto: taulukot ja rakeisuuskäyrät	
Liite B	Resilient-moduulit kolmiaksiaalikokeissa	
Liite C	Pysyvät muodonmuutokset kolmiaksiaalikokeissa	

1 Johdanto

Raidesepelin hienonemista on tarkasteltu Ratahallintokeskuksen toimeksiannosta tehdyissä tutkimuksissa viime vuosina. Tutkimuksissa on selvitetty eri sepelilaatujen elinkaaritaloudellisuutta (Nurmikolu 2000) sekä hienonemisen perusmekanismeja ja hienonemisen vaikutuksia kiviaineksen routimisherkkyyteen (Nurmikolu 2004, 2006). Samalla on tehty kehitystyötä tukikerroksen hienontuneisuuden arvioimiseksi maatutkauksen perusteella (Silvast ja Nurmikolu 2005, 2008; Passi 2007).

Sepelinpuhdistus on keskeinen päällysrakenteen perusparannustoimenpide, jossa tukikerroksesta poistetaan massiivisella seulptakoneella hienontunut kiviaines ja palautetaan karkearakeiset partikkelit takaisin rataa. Samalla poistetun hienorakeisen aineksen tilalle tukikerrokseen lisätään uutta karkearakeista raidesepeliä. Sepelinpuhdistus on iso investointi edellyttäen liikennekatkoa ja useiden kalustojen saumatonta yhteistoimintaa, mutta toimenpiteen seurauksena parannetaan merkittävästi tukikerroksen ja koko radan toimintakykyä. Pyrkimys suurempiin akselipainoihin ja liikennöintinopeuksiin lisää tukikerrokseen kohdistuvaa rasitusta, kiihdyttää raidesepelin hienonemista ja lisää puhdistustarvetta. Sepelinpuhdistuksen kustannukset ja vaikutukset huomioon ottaen menetelmän toimintaa ja kehittämismahdollisuuksia on tutkittu materiaalinäkökulmasta hyvin vähän.

Tässä työssä tarkastellaan pääosin Toijala-Turku ja Kuopio-Siilinjärvi rataosilla tehtyihin näytteenottoihin ja laboratoriotutkimuksiin perustuen tukikerroksen rakeisuutta sekä raidesepelin lujuus- ja muodonmuutosominaisuuksia erityisesti sepelinpuhdistuksen näkökulmasta. Erityistä huomiota kiinnitetään raidesepelin hienonemiseen ja sen vaikutuksiin em. ominaisuuksiin.

Luvussa 2 keskitytään sepelinpuhdistuksen vaikutuksiin koskien tukikerroksen rakeisuutta. Luvussa 3 arvioidaan täydennyssepelistä ja rataa palautetusta sepelistä koostuvan tukikerroksen homogeenisuutta sekä heikomman kiviaineksen alttiutta kiihdytetylle hienontumiselle lujan täydennyssepin vaikutuksesta. Luvussa 4 tarkastellaan rakeisuuden ja rakeiden kuluneisuuden vaikutusta sepelien muodonmuutosominaisuuksiin mittavassa syklisessä kolmiaksaalikoesarjassa. Luvussa 4 esitellään myös raidesepelille tehtyjä kolmiaksaalikokeita koskevan kirjallisuustarkastelun havaintoja, joista osa on hyvin käytännönläheisiä. Työn lopuksi esitellään päätelmät ja jatkotutkimustarpeet luvussa 5.

2 Raidesepelin rakeisuus sepelinpuhdistuksessa

2.1 Rakeisuustarkastelujen yleiskuvaus ja näytteenotto

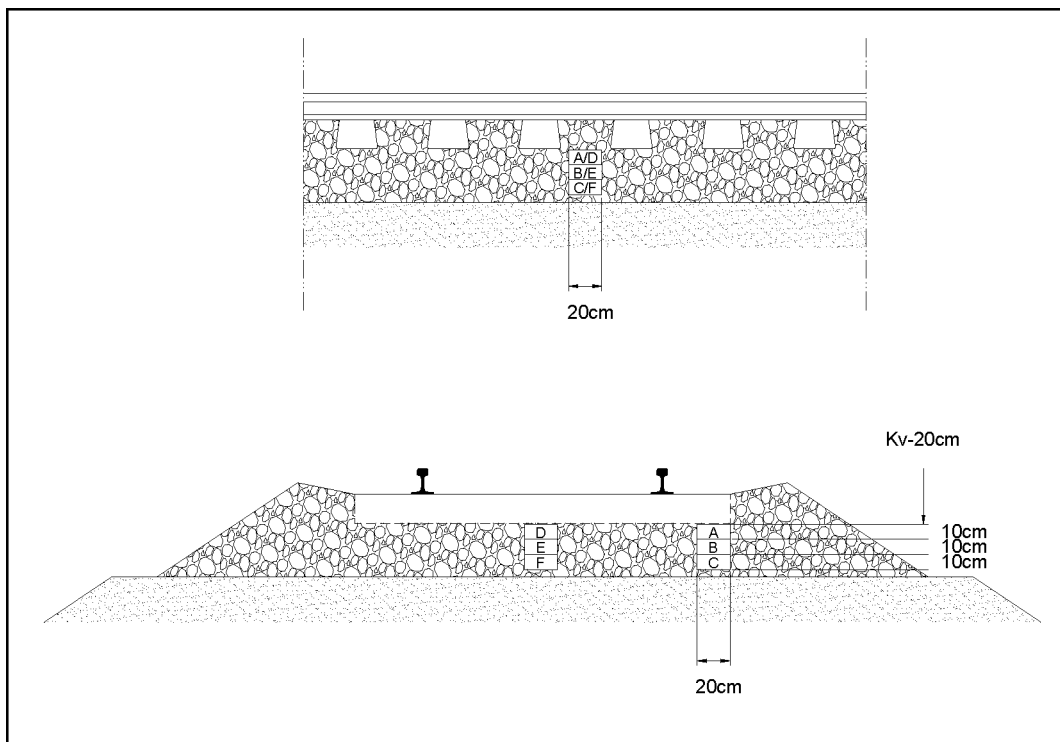
Työn ensimmäisessä osiossa tavoitteena oli todentaa tukikerroksen rakeisuus sepelinpuhdistuksen eri vaiheissa ja tarkastella sepelinpuhdistuksen vaikutusta tukikerroksen rakeisuuteen. Tarkoitusta varten otettiin näytteitä tukikerroksesta ennen sepelinpuhdistusta, sepelinpuhdistuksen yhteydessä rataa palautettavasta sepelistä ja hylkysepelistä, sekä täydennyssepelöinnin ja tuentojen jälkeisestä tukikerroksesta. Näytteistä määritettiin pesuseulontana raekokojakautumat, hienoainespitoisuudet sekä 1 mm, 8 mm ja 25 mm seulojen läpäisyprosenttien summana rakeisuusluvut. Rakeisuustietojen yhteenvetotaulukot sekä rakeisuuskäyrät on esitetty liitteessä A.

Näytteitä otettiin käsityönä kesällä 2007 käynnissä olleilta sepelinpuhdistustyömailta rataosilla Toijala-Turku sekä Kuopio-Siilinjärvi. Näytteiden koko vaihteli välillä 7,0–11,7 kg keskiarvon ollessa 8,9 kg.

Ennen sepelinpuhdistusta näytteet otettiin TTY:n toimesta Sepelitukikerroksen laadun tutkimusohjeen (RHK, 1997) mukaisesta (näyte B kuvassa 2.1) tukikerroksen kohdasta. Näytemäärä oli Tjl-Tku rataosalla 5 ja Kuo-Slj rataosalla 3.

Sepelinpuhdistuksessa rataa palautettavat ja hylkysepelinäytteet otettiin Oy VR-Rata Ab:n toimesta seulan kuljettimilta tulleesta aineksesta ennen täydennyssepelöintiä. Kyseisiä näytteitä otettiin Tjl-Tku rataosalta 8 kappaletta. Lisäksi työssä analysoitiin 75 rataa palautetun sepelinäytteen rakeisuuksia, jotka oli määritetty Oy VR Rata Ab:n tilaamana Geopalvelu Oy:n toimesta Tjl-Tku rataosan seulantatyön laadun tarkkailemiseksi. Vastaavasti analysoitiin Geopalvelun määrittämiä 66 hylkysepelinäytteen rakeisuustietoja Tjl-Tku rataosalta. Kuo-Slj rataosalla vastaavaa seulantatyön ja pengerlevitteeksi asennetun hylkysepelin laadun tarkkailua ei tehty.

Sepelinpuhdistuksen ja täydennyssepelöinnin jälkeisen tukikerroksen rakeisuutta tarkasteltiin Tjl-Tku rataosalla kolmessa kohteessa ja Kuo-Slj rataosalla kahdessa kohteessa. Kussakin kohteessa otettiin TTY:n toimesta kuusi näytettä siten, että kolme näytettä otettiin eri korkeustasolta (Kv–20...30cm, Kv–30...40cm ja Kv–40...50cm) ratapölkyn päiden välistä ja kolme näytettä vastaavilta korkeustasoilta raiteen keskeltä kuvan 2.1 mukaisesti.



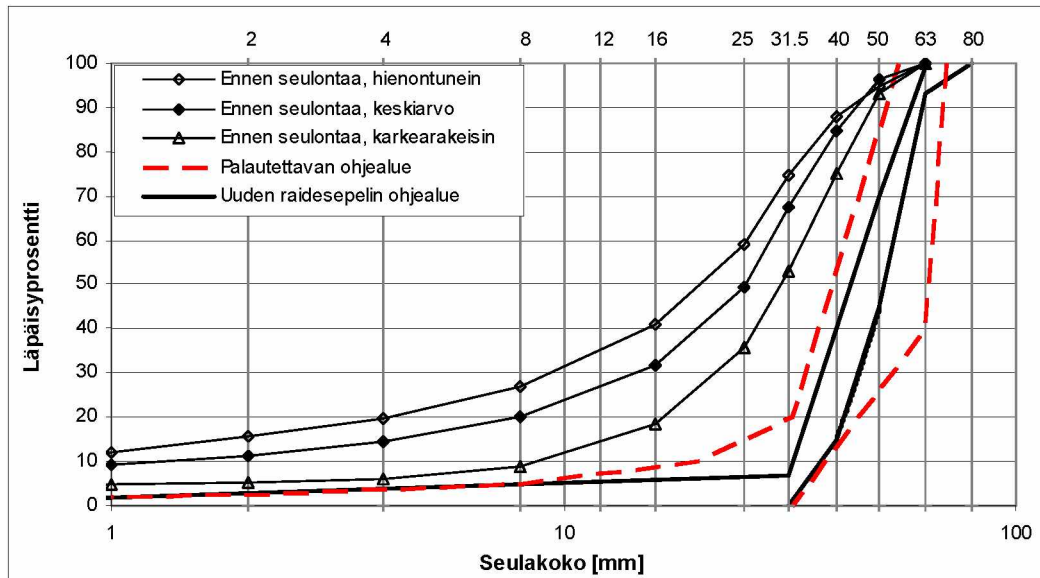
Kuva 2.1. Sepelinpuhdistuksen jälkeen otettujen näytteiden sijainnit (A...F) tukikerroksessa. Ennen sepelinpuhdistusta näytteet otettiin Sepelitukikerroksen laadun tutkimusohjeen (RHK, 1997) mukaisesti kohdasta B.

2.2 Tukikerros ennen sepelinpuhdistusta

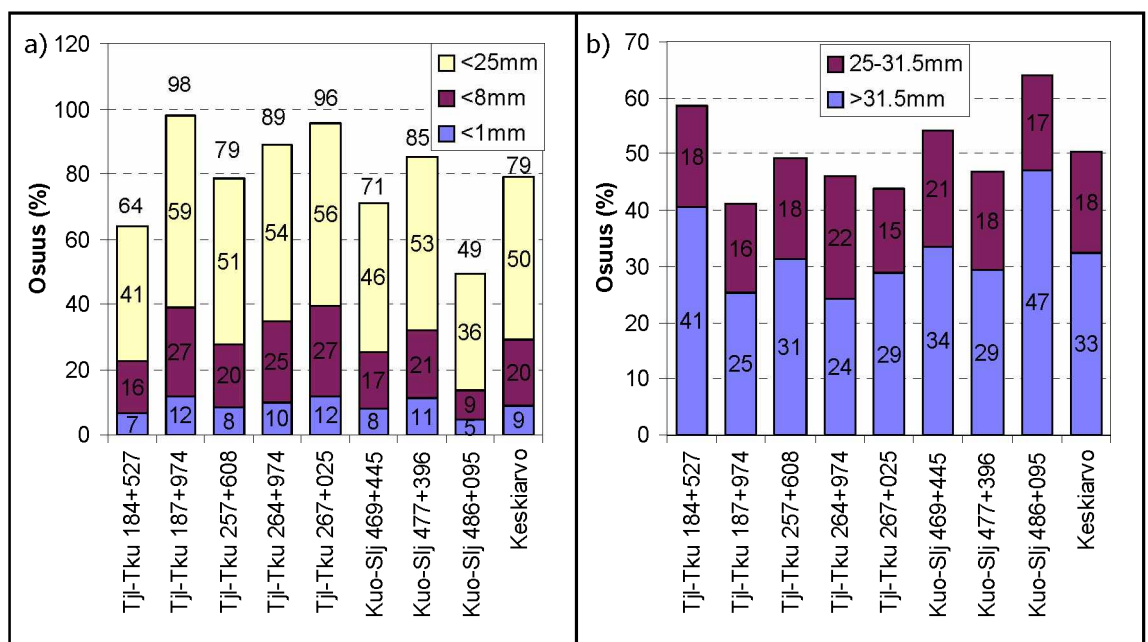
Ennen sepelinpuhdistusta Toijala-Turku rataosalta otettiin viisi ja Kuopio-Siilinjärvi rataosalta kolme tukikerroksnäytettä, joiden rakeisuustiedot on esitetty liitteessä A. Kuvassa 2.2 on esitetty karkea- ja hienorakeisimman näytteen rakeisuuskäyrä sekä kahdeksan näytteen läpäisyprosenttien keskiarvoja kuvaava keskimääräinen rakeisuuskäyrä. Kuvassa esitetyistä uuden (RHK, 2004) ja rataa palautettavan (RHK, 1998) sepelin rakeisuuskäyrien ohjealueista havaitaan, että sepelinpuhdistuksessa rataa sallitaan palautettavaksi uuden sepelin vaatimuksiin nähden selvästi enemmän pienikokoisia sepelirakeita.

Ennen sepelinpuhdistusta otettujen näytteiden keskimääräinen rakeisuusluku oli 79 ja vaihteluväli 49-98 (kuva 2.3 ja liite A). Karkearakeisten sepelirakeiden välisen huokostilan täyttymiseen perustuvana teoreettisena puhdistusrajana on pidetty rakeisuuslukua 88-90 (esim. RHK 2002). Elinkaaritaloudellisimman puhdistusajan kohdan määrittämisen tekee ongelmalliseksi se, että tukikerroksen hienontuneisuuden on havaittu vaihtelevan rataosasta riippumatta merkittävästi varsin lyhyelläkin välillä. Perusparannuksissa sepelinpuhdistuksen toteuttamista on kuitenkin yleensä tarve arvioida koko rataosaa tai huomattavan pitkää rataosuutta koskevana. Apua ristiriitaan tarjoaa moderni 3d-maatutkaus, joka tuottaa jatkuvaa dataa tukikerroksen hienontuneisuudesta ja mahdollistaa siten hienontuneimpien osaosuuksien erottelun. Uutta menetelmää on jatkossa mielekästä hyödyntää etenkin kunnossapitoon liittyvien sepelinpuhdistusten kohdentamisessa, mutta myös

perusparannusten yhteydessä, jolloin puhdistus voitaisiin kohdentaa koko rata-verkolla nopeusrajoitusten kannalta kriittisimmille osaosuuksille ja samalla puhdistuskilometrimäärällä saadaan suuremmat toiminnalliset hyödyt.



Kuva 2.2. RHK:n ohjealueet uuden raidesepelin (RHK, 2004) ja rataa sepelinpuhdistuksen yhteydessä palautettavan raidesepelin (RHK, 1998) rakeisuudelle sekä ennen sepelinpuhdistusta otettujen näytteiden rakeisuuskäyrien vaihteluväli ja näytteiden keskimääräisiä läpäisyprosentteja vastaava rakeisuuskäyrä.



Kuva 2.3. Ennen sepelinpuhdistusta otettujen tukikerrosnäytteiden a) hienontuneisuutta kuvaavat rakeisuusluvut (<25mm, <8mm ja <1mm ainesten osuuksien summa) sekä b) kooltaan suurimpien rakeiden suhteellista osuutta ilmentävät yli 31,5 mm rakeiden ja 25–31,5mm lajitteen suhteelliset osuudet.

Rataosien keskinäisessä vertailussa Tjl-Tku rataosan näytteet olivat keskimäärin hieman hienontuneempia kuin Kuo-Slj rataosan näytteet. Ero johtui suurelta osin yhdestä Kuo-Slj rataosan poikkeavan karkearakeisesta näytteestä (kuva 2.3a). Rakeisuusluvun keskiarvo oli Tjl-Tku rataosan näytteissä 85 ja Kuo-Slj rataosan näytteissä 69. On kuitenkin huomattava, että näytemäärä (5+3) on riittämätön pitkälle menevien päätelmien tekemiseksi.

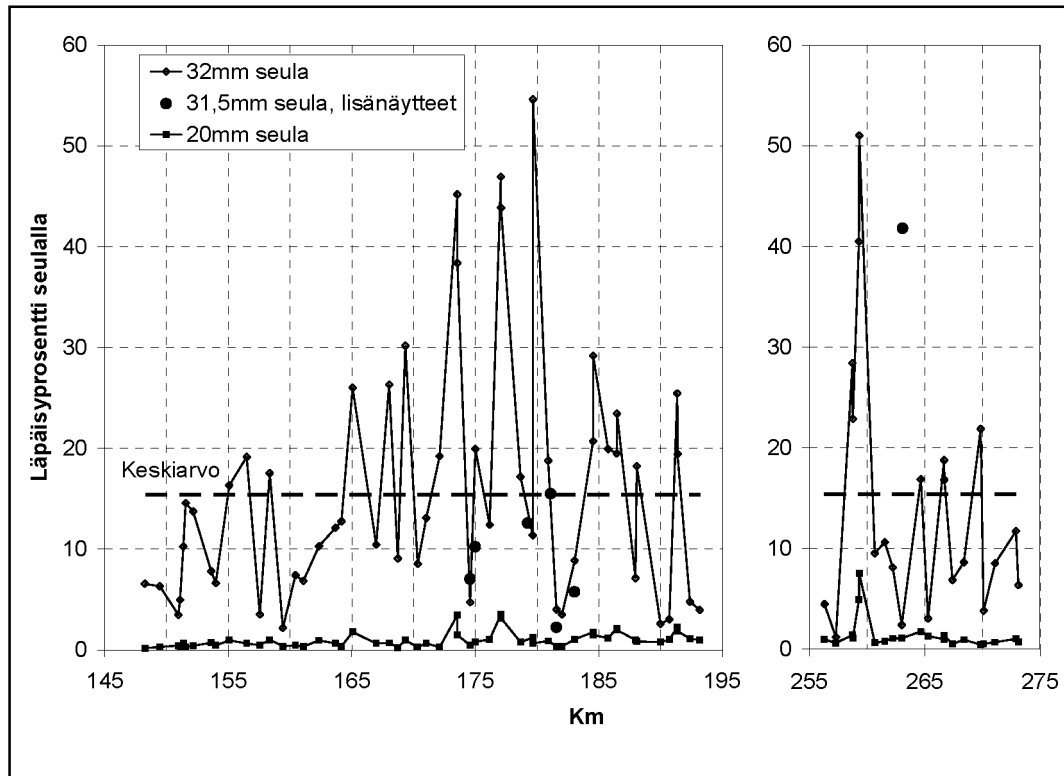
Ennen sepelinpuhdistusta otettujen näytteiden keskimääräinen hienoainespitoisuus oli 2,7 % ja vaihteluväli 1,8–3,9 % (liite A). Keskiarvo oli likimäärin sama eroteltuna Kuo-Slj rataosalle ja Tjl-Tku rataosalle. Laskettu keskimääräinen hienoainespitoisuus (2,7 %) on sama kuin aiemmassa tutkimuksessa (Nurmikolu 2006) arvioitu radan rakennekerroksissa käytettävän kalliomurskeen ”käytännöllisen routimattomuuden raja”, joten hienoainespitoisimmat näytemateriaalit ylittivät tämän rajan.

Kuvassa 2.3b on havainnollistettu kooltaan suurimpien rakeiden suhteellista osuutta ennen sepelinpuhdistusta otetuissa näytteissä. Kuvasta nähdään, että uuden raide-sepelin rakeisuusohjealueen alarajaa vastaavaa 31,5 mm raekokoa suurempaa ainesta oli näytteissä keskimäärin vain kolmannes vaihteluvälin ollessa 25–47 %. Vastaavasti 25 mm raekokoa suuremman aineksen vaihteluväli oli 41–64 % ja keskiarvo 51 %.

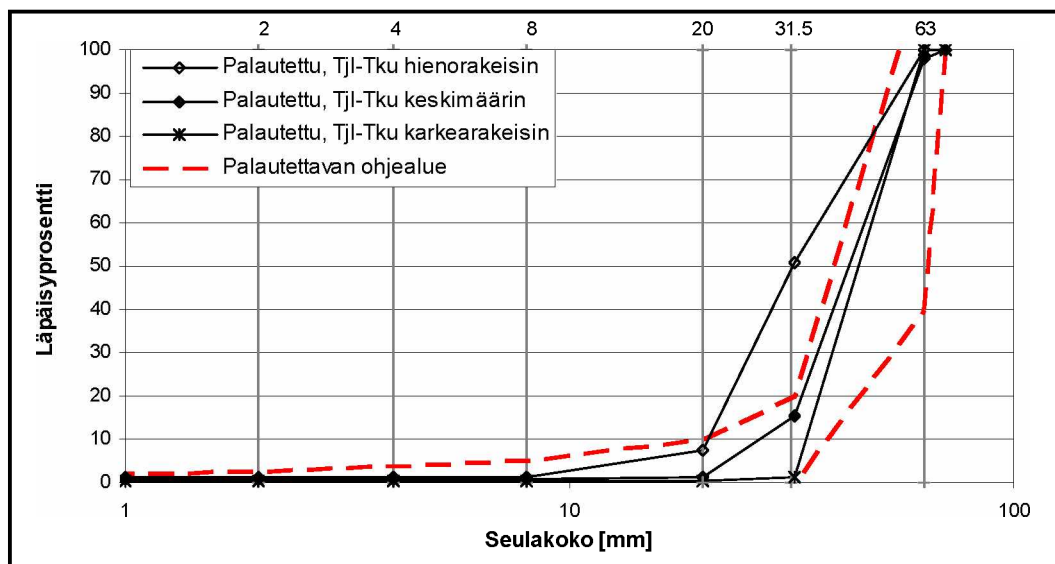
2.3 Rataan palautuva sepeli

Geopalvelu Oy:n toimesta määritetyt kuivaseulontatulokset Tjl-Tku rataosalla sepelinpuhdistuksessa rataan palautetuista 75 sepelinäytteestä (vrt. luku 2.1) on koottu kuvaan 2.4 32 mm ja 20 mm seulojen läpäisyprosenttien osalta. Tarkemmin seulontatulokset on kuvattu liitteen A taulukossa A.3. Kuvaan 2.4 on lisätty myös tämän tutkimuksen yhteydessä Tjl-Tku rataosalta otetun 7 näytteen läpäisyprosentit 31,5 mm seulalla. Kuvasta nähdään, että alle 20 mm rakeita oli näytteissä vain vähän, keskimäärin 1,1 % vaihteluvälin ollessa 0,2–7,5 %. Vastaavasti alle 32 mm rakeita oli keskimäärin 15,4 % ja vaihteluväli näiltä osin huomattavan suuri, 1,2–54,6 %. Suurimmat arvot ilmentävät runsasta lajitteen 20–32 mm osuutta ja lienevät seurausta voimakkaasti hienontuneesta alkuperäisestä sepelistä sekä lisäksi mahdollisesti siitä seuranneesta seulontakoneen seulastojen osittaisesta tukkeutumisesta. Seulontakoneen kapasiteetti samoin kuin seulonnan lopputulos riippuvat suuresti seulottavan tukikerroksen rakeisuudesta. Rataan palautettavan sepelin rakeisuuden ohjealueen rajaa (RHK, 1998) vastaava 20 % läpäisyprosentti 32 mm seulalla ylittyi yhteensä noin viidenneksessä näytteistä. Muiden seulakokojen ohjeelliset raja-arvot eivät näytteissä ylittyneet.

Kuvassa 2.5 esitetyistä rataan palautettujen sepelien rakeisuuskäyristä nähdään, että näytteiden läpäisyprosenttien keskiarvoa kuvaava keskimääräinen rakeisuuskäyrä sijoittuu palautettavan raidesepelin ohjealueelle. Verrattaessa kuvan 2.5 rakeisuuskäyriä esimerkiksi kuvan 2.2 käyriin tulee huomata, että kuvan 2.5 käyrät nousisivat 32 mm suuremmilla seuloilla selvästi kuvassa esitettyä jyrkemmin ylöspäin ja saavuttaisivat todennäköisesti lähes 100 % läpäisyprosentin ennen 63 mm seulaa, mikäli myös 40 mm ja 50 mm väliseuloja olisi käytetty. Ne eivät kuitenkaan olleet tarpeen hienorakeisen aineksen osuuteen keskittyneessä laadun tarkkailussa.



Kuva 2.4. Geopalvelu Oy:n kuivaseulonnassa määrittämät 32 mm ja 20 mm seulojen läpäisyprosentit Tjl-Tku rataosalla tukikerroksen puhdistuksen yhteydessä rataa palautetusta sepelistä otetuissa yhteensä 75 näytteessä. Kuvassa on lisäksi esitetty tämän työn yhteydessä pesuseulontana tarkasteltujen lisänäytteiden läpäisyprosentit 31,5 mm seulalla.



Kuva 2.5. Tjl-Tku rataosalla rataa palautetusta sepelistä otettujen 75 näytteen kuivaseulontatuloksista (Geopalvelu Oy) laskettuja keskimääräisiä läpäisyprosentteja vastaava rakeisuuskäyrä sekä karkearakeisimman ja hienorakeisimman näytteen rakeisuuskäyrät.

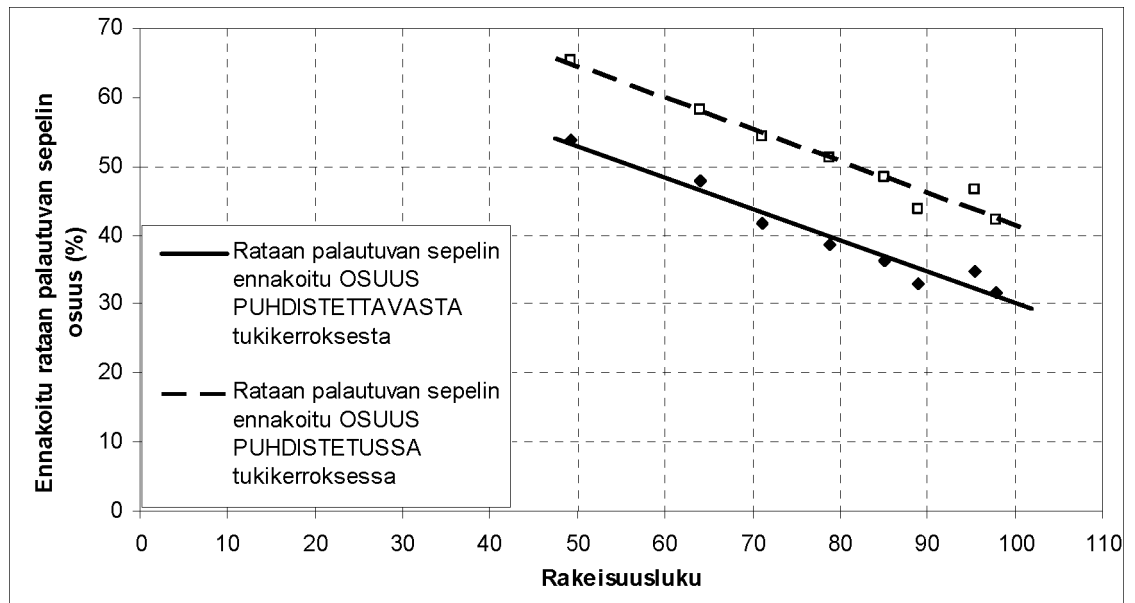
Edellisessä luvussa tarkastellusta kuvasta 2.3 voidaan todeta, että lajitteen 25–31,5 mm osuus yli 25 mm aineksesta oli ennen puhdistusta otetuissa tukikerrosnäytteissä keskimäärin 36 %. Tjl-Tku rataosalla rataa palautetun 75 sepelinäytteen keskiarvona läpäisyprosentti 32 mm seulalla oli 15,4 %. Nämä tiedot yhdistämällä rataa todellisuudessa palautuvan sepelin määrää voidaan arvioida ennen puhdistusta otetun näytteen rakeisuudesta lisäämällä kooltaan yli 31,5 mm aineksen osuuteen noin 40 % lajitteen 25–31,5 mm osuudesta. Tällöin arviointi voidaan tehdä rakeisuusluvun perusteella kuvan 2.6 mukaisesti.

Palautettavan aineksen ennakoitu osuus vastaa rakeisuuskäyrän havaintopisteistä interpoloituna noin 28 mm seulakokoa karkeamman aineksen osuutta. Seulontakoneessa rajaseulana on kuitenkin 35 mm seula. Ero selittyy sillä, että nopeassa seulontatapahtumassa osa seulakokoa pienemmästä aineksesta ei ehdi asettua sopivaan asentoon seulan läpäisemiseksi. Kun rataa palautetun sepelin 32 mm ja 20 mm seulojen läpäisyprosentteista interpoloidaan 25 mm seulan läpäisyprosentti, saadaan palautettujen sepeleiden keskimääräiseksi rakeisuusluvuksi 8 ja rakeisuusluvun vaihteluväliksi 2–28.

Rataa palautuvan sepelin osuutta tarkasteltaessa on huomattava, että puhdistettavasta tukikerroksesta rataa palautuvan sepelin osuus ei ole sama kuin rataa palautuvan sepelin osuus puhdistetussa tukikerroksessa, koska hienontuneen sepelin kuivairtotiheys tukikerroksessa on huomattavasti suurempi kuin tasarakeisen puhdistetun sepelin. Luvussa 4.3 (taulukko 4.2) kuvatussa vakioidussa tiivistyksessä uuden ja rataa palautetun sepelin seokselle kuivairtotiheydeksi saatiin noin $1,65 \text{ t/m}^3$ ja puhdistusrajaalla olevalle sepelille vastaavasti noin $2,20 \text{ t/m}^3$. Puhdistettavassa tukikerroksessa sepelin irtotiheys voi olla jopa 40 % suurempi kuin uudessa tukikerroksessa. Asian käytännön merkitystä havainnollistaen voidaan todeta, että korkeusviivan säilyttämiseen tähtäävässä kunnossapidossa sepeliä tulee lisätä sepelin puhdistusten välisenä aikana noin 40 % alkuperäisestä sepelimäärästä pelkästään tukikerroksen hienonemisen aiheuttaman tiivistymisen takia. (Tämän lisäksi täydennyssepelöintitarvetta aiheuttaa alempien rakennekerrosten ja pohjamaan mahdolliset pysyvät muodonmuutokset.) Tukikerroksen hienonemisen myötä tapahtuva irtotiheyden kasvu on luonnollinen seuraus siitä, että hienorakeinen aines täyttää karkeiden rakeiden välistä huokostilaa.

Kuvassa 2.6 on esitetty taulukon 4.2 pohjalta arvioidut irtotiheyserot huomioiden rakeisuuslukuun perustuva ennakointi myös palautettavan sepelin osuudesta *puhdistuksen jälkeisessä* tukikerroksessa, jolla on suurempi merkitys arvioitaessa täydennyssepelin tarvetta sepelinpuhdistuksen yhteydessä. Tukikerroksen jälkeiselle irtotiheydelle on laskennassa käytetty arvoa $1,65 \text{ t/m}^3$. Mikäli alkutuentojen ja ensimmäisten junien aiheuttaman hienonemisen (vrt. luku 2.5) seurauksena tiheys kasvaa tätä suuremmaksi, täydennyssepelin tarve on hieman suurempi.

Kuvan nojalla teoreettisen puhdistusrajan saavuttaneesta sepelistä (rakeisuusluku 88–90) palautuu rataa vain noin 35 %. Näin siis siitäkin huolimatta, että rataa palautettavan sepelin rakeisuus on selvästi uuden raidesepelin rakeisuutta hienorakeisempi (vrt. kuva 2.2). Tämä vastaa noin 47 % rataa palautettavan sepelin osuutta puhdistuksen jälkeisessä tukikerroksessa, eli täydennyssepelin tarve olisi noin 53 %. Keskimäärin puolet sepelistä palautuu rataa silloin, kun puhdistettavan sepelin rakeisuusluku on noin 56. Tällöin täydennyssepelin tarvittaisiin vain noin 38 %. Täydennyssepelin ja rataa palautetun sepelin osuudet ovat yhtä suuret rakeisuusluvun ollessa 82.

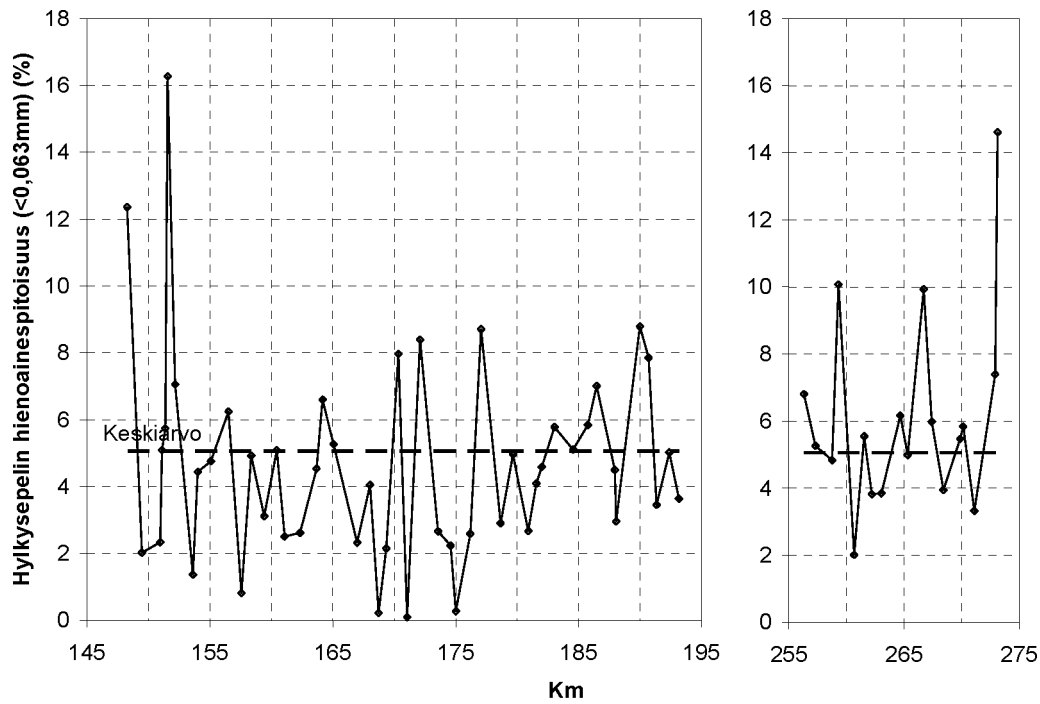


Kuva 2.6. Rataan palautuvan sepelin osuuden ennakointi rakeisuusluvun perusteella.

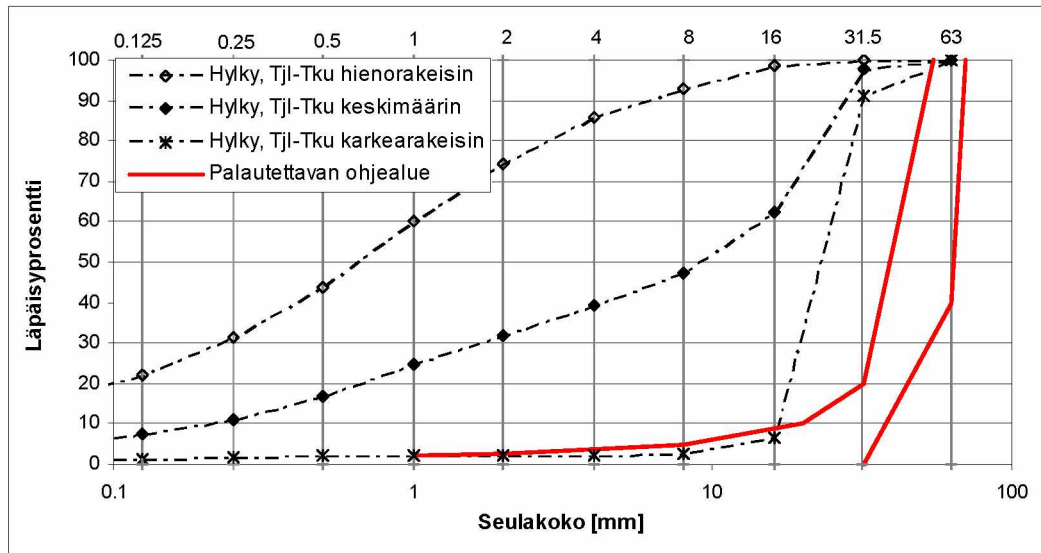
2.4 Hylkysepelä

Sekä Tjl-Tku että Kuo-Slj ratasosalla sepelinpuhdistuksessa syntynyt hylkysepelä ohjattiin penkereen levitteeksi. Tästä syystä myös sen rakeisuuden tarkastelu oli perusteltua. Hylkysepin rakeisuutta on tarkastelu Tjl-Tku rataosan näytteille Geopalvelun toimesta tehtyjen pesuseulontojen yhteenvedona kuvissa 2.7 ja 2.8. Tarkemat seulontatiedot on esitetty liitteen A taulukossa A.4. Kuvassa 2.7 esitetyn hienoainespitoisuuden ($<0,063$ mm) vaihteluväli oli 0,8-16,3 % ja 66 näytteen keskimääräinen arvo 5,1 %. Näytteistä noin neljä viidennestä ylitti ”käytännöllisen routimattomuuden rajaksi” arvioitun (Nurmikolu 2006) 2,7 % hienoainespitoisuuden. On kuitenkin todettava, että pengerlevitteeksi asennetun materiaalin routivuus ei todennäköisesti juurikaan lisää radan routahaittoja. Keskeisempi vaikutus pengerlevitysmateriaalilla on rakenteen kuivatukseen. Hienoainespitoisuus indikoi epäsuorasti myös tästä vaikutuksesta, mutta absoluuttisen vaikutustason arviointi edellyttäisi lisätutkimuksia.

Kuvasta 2.8 nähdään, että yli 32 mm rakeita oli hylkysepelissä luonnollisesti hyvin vähän, keskimäärin 2,2 %. Koska puhdistettavan tukikerroksen rakeisuus vaihtelee suhteellisen paljon, on luonnollista, että myös hylkysepin rakeisuuksien vaihteluväli on kuvan 2.8 mukaisesti suhteellisen laaja. Esimerkiksi 8 mm seulan läpäisyprosentti vaihteli hylkysepinäytteissä välillä 2,7-93 % ja keskimääräinen arvo oli 47 %.



Kuva 2.7. Geopalvelu Oy:n pesuseulonnassa määrittämät hienoainespitoisuudet Tjl-Tku rataosalla tukikerroksen puhdistuksessa syntyneestä jätesepeleistä otetuissa 66 näytteessä.



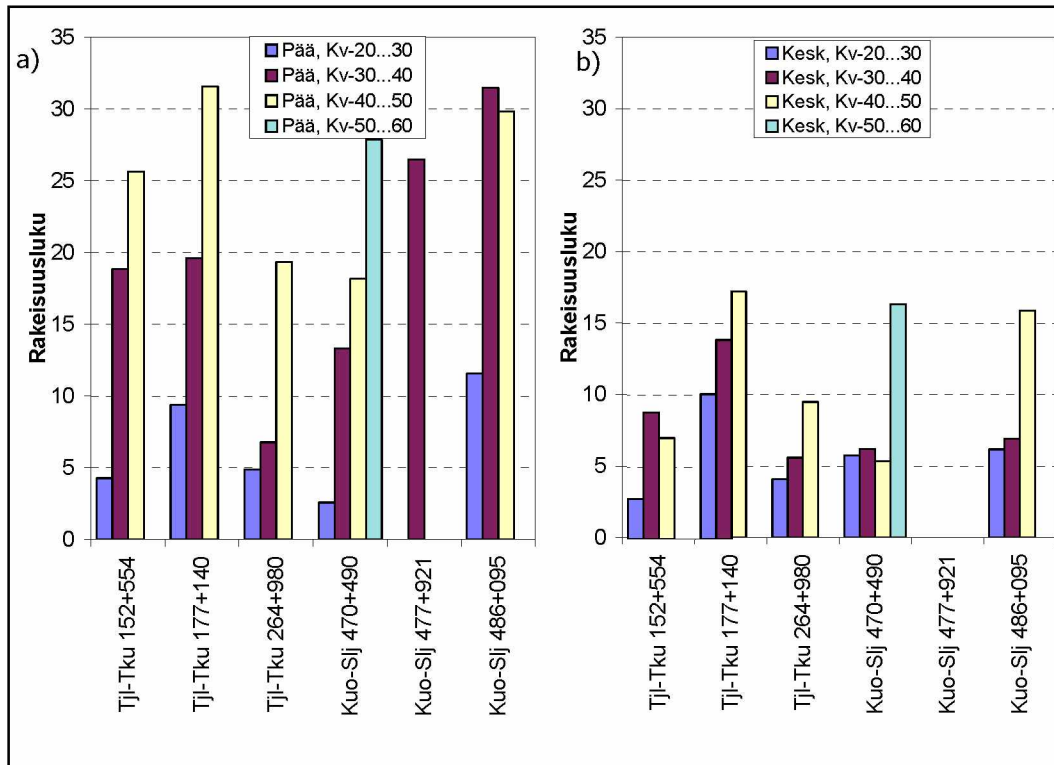
Kuva 2.8. Tjl-Tku rataosalla jätesepeleistä otettujen 66 näytteen pesuseulontatuloksista (Geopalvelu Oy) laskettuja keskimääräisiä läpäisyprosentteja vastaava rakeisuuskäyrä sekä karkearakeisimman ja hienorakeisimman näytteen rakeisuuskäyrät.

2.5 Tukikerros sepelinpuhdistuksen jälkeen

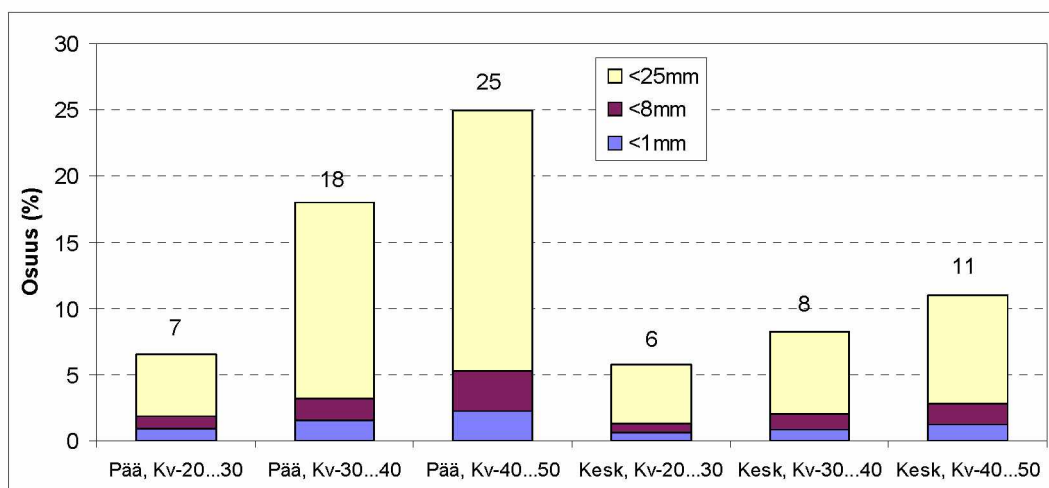
Sepelinpuhdistuksen ja täydennyssepelöinnin jälkeisen tukikerroksen rakeisuutta tarkasteltiin kuvan 2.1 mukaisesti sekä ratapölkyn päästä, että raiteen keskeltä kolmelta korkeustasolta otetuista näytteistä yhteensä viidessä kohteessa, joista kolme sijaitsi Tjl-Tku rataosalla ja kaksi Kuo-Slj rataosalla. Kohteessa Kuo-Slj 470+490 otettiin lisäksi neljännet näytteet vielä syvemmältä (Kv=50...60cm). Kuudennessa kohteessa (Kuo-Slj 477+921) otettiin lisäksi yksi näyte pölkyn päiden välistä tasolta Kv=30...40cm. Näytteiden seulontatiedot on esitetty liitteessä A.

Kuvasta 2.9a nähdään, että ratapölkyn päiden välissä rakeisuusluku kasvaa poikkeuksetta jokaisessa tarkastelukohteessa näytteenottosyvyyden suhteen. Raiteen keskeltä (kuva 2.9b) vastaava ilmiö näkyy huomattavasti lievempänä. Kuvassa 2.10 esitetyt viiden tarkastelukohteen keskimääräiset rakeisuusluvut tukikerroksen eri kohdissa havainnollistavat eroja selkeästi. Kuvista nähdään myös, että raiteen keskellä rakeisuusluvut olivat ylimmän näytteenottotason alapuolella selvästi pienempiä (keskiarvot 8-11) kuin ratapölkyn päiden välissä (keskiarvot 18-25). Koska raiteen keskelle ei kohdistu tukemista ja liikennekuormitustakin vain rajoitetusti, havainto ilmentää väistämättä sitä, että alkutuenta sekä aivan ensimmäisten junien aiheuttama kuormitus hienontaa raidesepeä hyvin merkittävästi. Sepelitukikerroksen laadun tutkimusohjeen mukaisessa tukikerroksen kohdassa (Pää, Kv=30...40cm) rakeisuusluku on tarkastelukohteissa keskimäärin 18 ja 10 cm alempana jopa 25. Vastaavasti rataa palautetun sepelin keskimääräiseksi rakeisuusluvuksi laskettiin edellisessä luvussa arvo 8, joka vielä pienenee karkearakeisen täydennyssepin vaikutuksesta. Toisaalta myös sepelin asennus hienontaa kiviainesta, mutta siinä suhteessa vaikutus voidaan olettaa samaksi raiteen keskellä ja reunoilla. Raiteen keskellä rakeisuusluvut olivat lähellä rataa palautetun sepelin keskimääräistä rakeisuuslukua.

Ero raiteen keskellä ja ratapölkyn päiden välissä havaituissa rakeisuuksissa ei selity myöskään sillä, että raiteen keskellä olisi enemmän uutta täydennyssepeä (vrt. luku 3.2). Sen sijaan syvemmälle mentäessä rataa palautetun sepelin osuus kasvaa ja täydennyssepin osuus vähenee, mutta sekin selittää rakeisuuseroa vain osin (luku 3.2).



Kuva 2.9. Sepelinpuhdistuksen jälkeisen tukikerroksen rakeisuusluvut eri syvyystasooilla (Kv:sta lukien) a) ratapölkyn päiden välissä ja b) raiteen keskellä.



Kuva 2.10. Keskimääräiset rakeisuusluvut (<25mm, <8mm ja <1mm ainesten osuuksien summa) eri kohdissa tukikerrosta sepelinpuhdistuksen jälkeen.

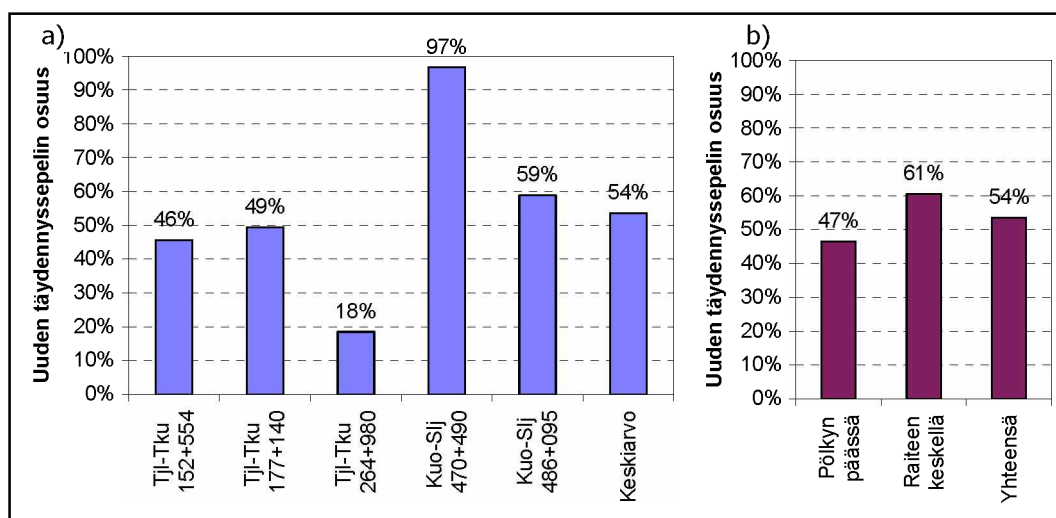
3 Täydennyssepin ja rataan palautetun sepelin seos

3.1 Tutkimusosion yleiskuvaus

Työn toisessa osiossa tarkasteltiin yhtäältä sepelinpuhdistuksessa rataan palautettavan sepelin ja täydennyssepin sijoittumista tukikerroksessa ja toisaalta kahden lujuudeltaan erilaisen sepelin muodostaman seoksen hienonemislähtöä. Tavoitteena oli arvioida kiihdyttäväkö lujat täydennyssepelirakeet lujuudeltaan heikomman rataan palautetun kiviaineksen hienonemista.

3.2 Täydennyssepin sijoittuminen tukikerrokseen

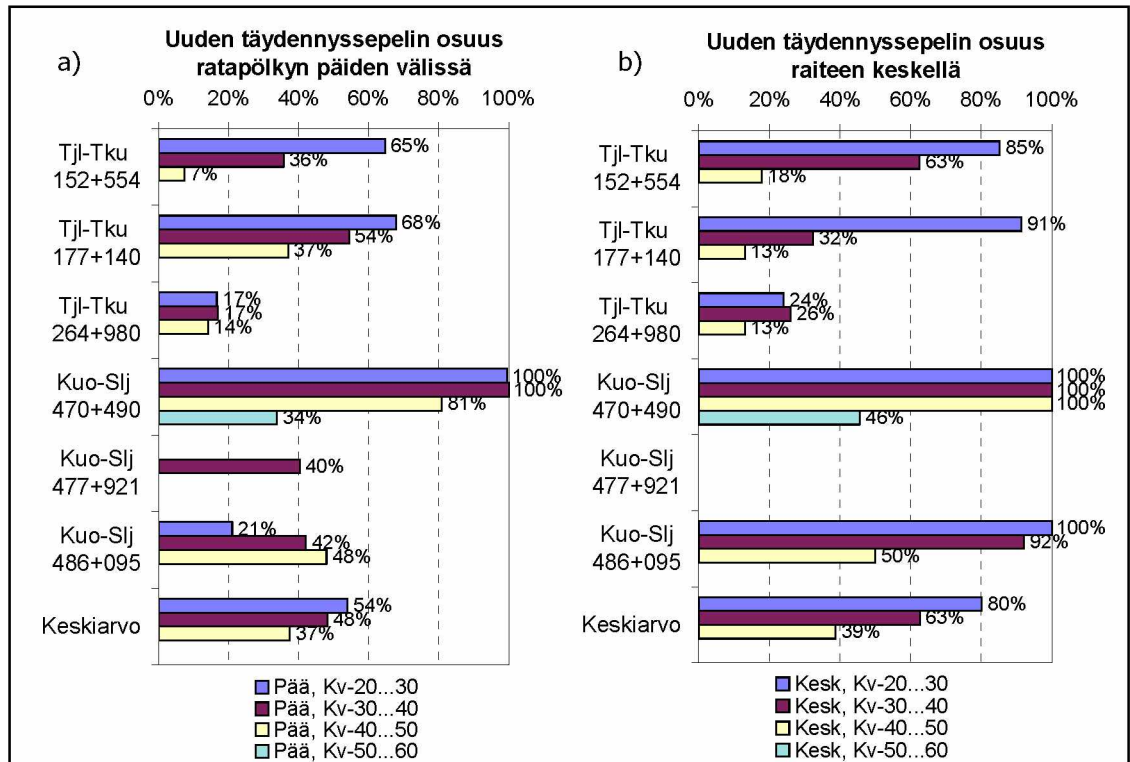
Sepelinpuhdistuksen jälkeistä tukikerroksen kiviainesten sekoittuneisuutta tarkasteltiin näytteistä, joiden rakeisuustulokset esitettiin luvussa 2.5. Kyseiset näytteet otettiin tukikerroksesta raiteen keskeltä ja ratapölkyn päiden välistä kolmelta korkeus-tasolta (vrt. kuva 2.1) viidessä eri kohteessa. Kohteessa Kuo-Slj 470+490 otettiin lisäksi näytteet neljänneltä syvyystasolta ja kuudennessa kohteessa (Kuo-Slj 477+921) otettiin yksi näyte pölkyn päiden välistä tasolta Kv-30...40cm, joten näytteiden kokonaismäärä oli 33. Näytteiden sisältämä yli 16 mm kiviaines jaoteltiin silmä-määräisessä tarkastelussa rataan palautettuihin ja uusiin täydennyssepelirakeisiin. Kuvassa 3.1 on esitetty yli 16 mm aineksesta kullekin kohteelle kuudesta näytteestä lasketut keskimääräiset täydennyssepin osuudet tukikerroksen tasolla Kv-20...50cm.



Kuva 3.1. Yhteenveto täydennyssepin keskimääräisistä osuuksista sepelinpuhdistuksen jälkeisessä tukikerroksessa laskettuna raiteen keskeltä ja pölkyn päästä tasoilta Kv-20...50 otetuista näytteistä a) eri kohteissa ja b) kaikkien kohteiden keskiarvot pölkyn päässä ja raiteen keskellä. Tulokset on laskettu yli 16 mm aineksesta.

Täydennyssepin osuuden vaihtelu kohteiden välillä on luonnollinen seuraus vaihtelusta alkuperäisen tukikerroksen hienontuneisuudessa ja siten rataa palautuvan sepin määrissä. Kuvaa 3.1 tarkasteltaessa on kuitenkin syytä todeta, että kohteessa Kuo-Slj 470+490 otettiin sepinpuhdistuksen yhteydessä suuri määrä rataa palautettua sepeä lujuuksien (luku 3.3) ja kolmiaksaalikokeiden (luku 4) näytemateriaaliksi. Tämä todennäköisesti vaikutti ratkaisevasti siihen, että sepinpuhdistuksen jälkeiset näytteet koostuivat tällä kohtaa käytännössä kokonaan täydennyssepeistä. Toisaalta kuvasta nähdään, että kohteessa Tjl-Tku 264+980 täydennyssepin osuus on vähäinen (18 %). Tulos on yllättävä etenkin, koska kohteesta ennen tukikerroksen puhdistusta otettu näyte (luku 2.2) osoitti raidesepin olleen voimakkaasti hienontunutta (vain 46 % yli 25 mm ainesta). Kohteen Kuo-Slj 486+095 tulos on päinvastaisella tavalla ristiriitainen, sillä siellä ennen sepinpuhdistusta sepeä todettiin tarkastelluista vähiten hienontuneeksi (64 % yli 25 mm ainesta), mutta täydennyssepin osuus oli kuitenkin melko suuri (59 %). Kaikkien kohteiden keskiarvona täydennyssepin osuus oli 54 %.

Kuvan 3.1 kohdekohtaiset tulokset on jaoteltu tukikerroksen eri kohdista ja syvyystasoilta otettuihin näytteisiin kuvassa 3.2. Kuvasta nähdään, että täydennyssepin osuus alenee merkittävästi mentäessä tukikerroksessa alaspäin. Asialla on periaatteellista merkitystä sikäli, että lujan täydennyssepin hyöty on vähäinen, mikäli kuormituksen välittämisen kannalta kriittisimmissä tukikerroksen osissa pääasiallinen kiviaines on kuitenkin vanha rataa palautettu sepeä. Täten myös rakeisuus hienonee tukikerroksessa alaspäin mentäessä jo ennen kuin hienonemista on tapahtunut, koska uusi sepeä on rataa palautettavaa sepeä karkearakeisempaa. Tarkastelluissa näytteissä raiteen keskellä tasolla Kv-20...30cm täydennyssepin keskimääräinen osuus oli 80 %, mutta tasolla Kv-40...50cm vain 39 %. Pölkyn päässä korkeustasosta riippuva ero vaikuttaisi olevan vähäisempi (54 % - 38 %). Tähän saattaa olla vaikutusta tukemisella, jossa täydennyssepeirakeita työntyy myös tukikerroksen alemmille tasoille. Täydennyssepin sekoittumista myös tukikerroksen alempiin osiin voitaisiin edesauttaa sepinpuhdistusta edeltävällä runsaalla sepeäloinnilla.



Kuva 3.2. Täydennyssepin osuus sepelinpuhdistuksen ja alkutuntojen jälkeisessä tukikerroksessa yli 16 mm aineksessa a) ratapölkyn päiden välissä ja b) raiteen keskellä.

Raiteen keskellä täydennyssepin osuus oli keskimäärin suurempi (61 %) kuin ratapölkyn päässä (47 %) (kuva 3.1b). Jotta lujaa täydennyssepeä saataisiin mahdollisimman runsaasti kuormitusten kannalta kriittisimmille alueille ratapölkyn päihin, palautettavaa sepeä olisi edullista ohjata mahdollisimman runsaasti raiteen keskelle. Tässä on kuitenkin huomioitava puhdistus- ja sepeleöntikaluston liikennöinnin mahdollistaminen ja ratapölkkyjen vaurioitumisen estäminen.

Rakeiden jaottelu tehtiin erikseen lajitteissa 16/25, 25/31,5, 31,5/40, 40/50, 50/63 ja yli 63 mm. Uuden sepin karkearakeisuudesta johtuen luonnollinen havainto oli, että täydennyssepin osuus pieneni hieman tarkastellun raekoon pienentyessä.

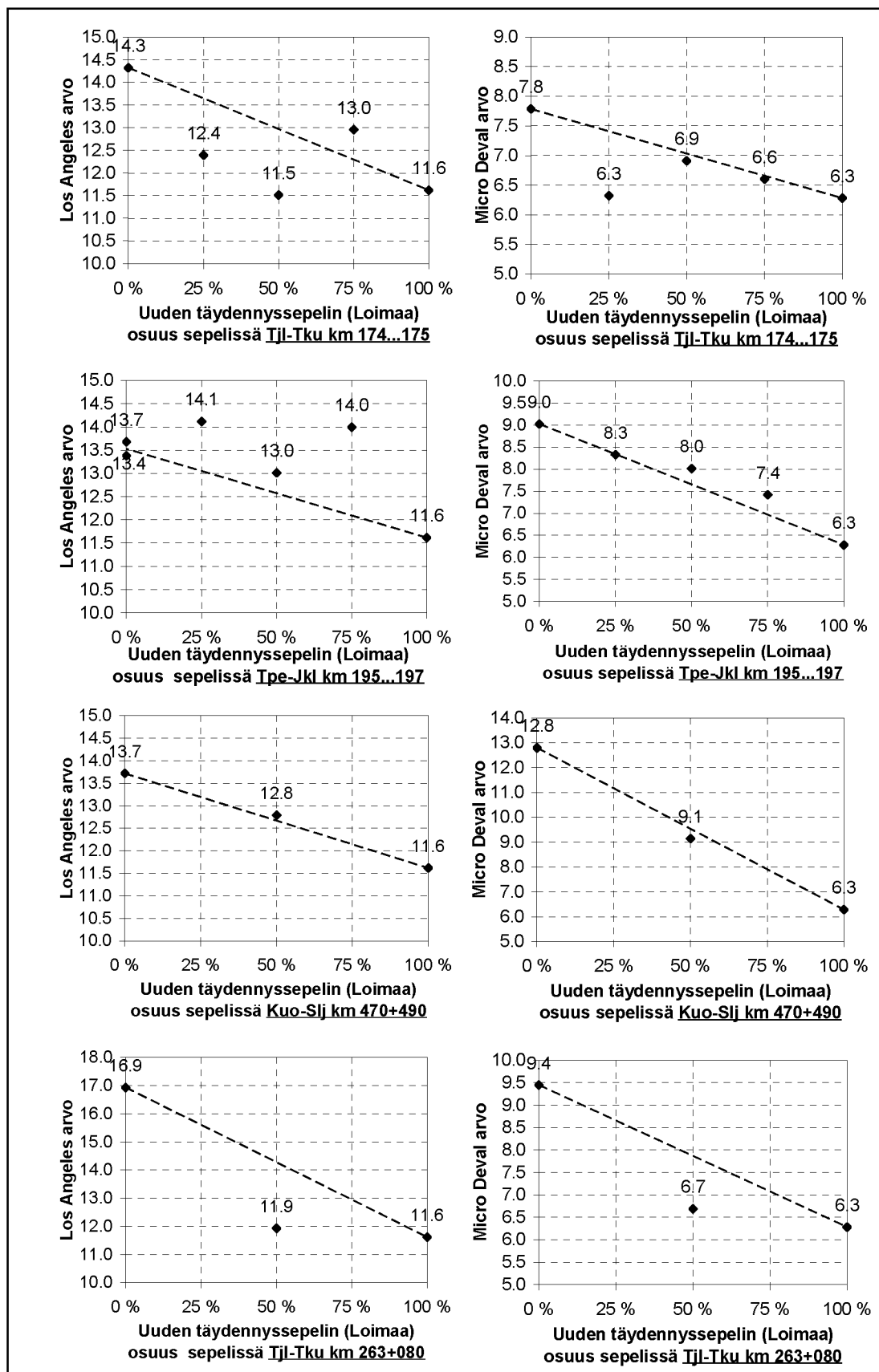
3.3 Lujuudeltaan erilaisten kiviainesten seoksen jauhautuminen

Lujuudeltaan erilaisten sepeleiden seoksen hienonemista tarkasteltiin raidesepele-standardin (SFS-EN 13450) mukaisesti korjatuissa raidesepele lujuustesteissä. Sekä Los Angeles- (SFS-EN 1097-2) että micro-Deval-testi (SFS-EN 1097-1+A1) perustuvat kiviaineksen rasittamiseen pyörittämällä sitä terässylinteriin suljettuna tietyllä nopeudella tietty kierrosmäärä. Los Angeles-testissä kiviaineksen seassa on mukana teräskuulia, jotka korostavat kiviainekseen kohdistuvaa iskevää rasitusta. Micro-Deval-testissä kiviaineksen sylinteriin lisätään vettä, jolloin kuormitus on ensi sijassa hiovaa. Molemmissa kokeissa testin tulos määritetään kokeessa syntyneen hienontuneen kiviaineksen osuuden perusteella.

Kokeet tehtiin lujuudeltaan heikommille rataan palautetuille sepeleille, uudelle lujalle sepelille sekä näiden seoksille eri seossuhteilla. Tällöin lujan täydennyssepin mahdollinen heikomman kiviaineksen hienonemista kiihdyttävä vaikutus tulisi esiin kiviainesten seoksen poikkeavan suurena hienonemisena testissä. Kokeissa tarkasteltiin neljää rataa palautettuja sepeleitä kohteista Tjl-Tku km 174...175, Tpe-Jkl km 195...197, Kuo-Slj km 470+490 ja Tjl-Tku 263+080 sekä Loimaan uutta täydennyssepeleä.

Los Angeles- ja micro-Deval-testien tuloksia on tarkasteltu kuvassa 3.3 perustuen siihen, kuinka suuri osuus täydennyssepeleä kuhunkin rataa palautettuun sepeleeseen on lisätty. Sadan prosentin osuus kuvaa pelkälle Loimaan kiviainekselle tehdyn testin tulosta ja nollan prosentin osuus pelkälle kyseiselle rataa palautetulle sepelille tehtyjen testien tuloksia. Näiden ääripäiden määräämä laskennallinen odotusarvo molempia kiviaineksia sisältävien seosten tuloksille on hahmoteltu kuviin katkoviivalla. Tällöin katkoviivan yläpuoliset havaintopisteet (koetulokset) ilmentävät odotusarvoa suurempaa hienonemista ja päinvastoin.

Kuvan 3.3 tuloksista nähdään, että lujuudeltaan erilaisten sepeleiden hienonemiselle ei voitu havaita systemaattista poikkeamaa odotusarvoa kuvaavasta katkoviivasta. Kiviaineksessa Tpe-Jkl km 195...197 luja täydennyssepele vaikutti kiihdyttävän hienonemista erityisesti Los Angeles-testissä, mutta molemmissa Tjl-Tku rataosan kiviaineksissa tilanne oli päinvastainen.



Kuva 3.3. Lujuudeltaan erilaisten sepelien seosten Los Angeles- (vas.) ja micro-Deval-testien (oik.) tulokset. Katkoviiva kuvaa laskennallista odotusarvoa eri seossuhteilla.

4 Sepelin muodonmuutosominaisuudet kolmiaksiaalikoikeissa

4.1 Kolmiaksiaalikoetarkastelujen yleiskuvaus

Työn kolmannessa osiossa tutkittiin raidesepelin kuormanvälityskyvyn riippuvuutta sepelin hienontuneisuudesta ja rakeiden pyöristyneisyydestä. Tarkastelut tehtiin suuren mittakaavan dynaamisessa kolmiaksiaalikoelajärjestelyssä käyttäen 300 mm näytehalkaisijaa ja 600 mm näytekorkuutta. Kokeissa tutkittiin toistokuormituksen alaisten materiaalien kimmoista ja pysyvää muodonmuutuskäyttäytymistä eri jännitystiloissa. Kimmoisen käyttäytymistä varten määritettiin materiaalien resilient-moduuli standardin SFS-EN 13286-7 mukaisessa kuormituksessa. Pysyvää muodonmuutuskäyttäytymistä tarkasteltiin resilient-moduulin määrittäystä seuranneissa suurempien kuormitusympäristöjen syklisissä kokeissa, joissa kuormituspulssin suuruutta kasvatettiin vaiheittain.

Kuormituskokeet tehtiin yhteensä 15 materiaalille. Materiaaleina käytettiin uusia raidesepeleitä, tukikerroksen puhdistuksen yhteydessä rataan palautettuja raidesepeleitä ja hylättyjä jätesepeleitä sekä näiden seoksia. Seosnäytteissä varioitiin raidesepelin hienontuneisuusastetta ja rakeiden kuluneisuutta.

Käytäntöön sovellettava tavoite tarkastelutavan valinnan taustalla oli pyrkimys arvioida rataa sepelinpuhdistuksessa palautettavien karkeiden, mutta pyöristyneiden sepelirakeiden sekä raidesepelin sisältämän hienorakeisen aineksen merkitystä tukikerroksen muodonmuutuskäyttäytymiseen. Muodonmuutosominaisuuksien tarkastelu on uusi näkökulma routimisherkkyystarkastelujen rinnalle, kun pyritään todentamaan radassa tapahtuvan raidesepelin hienonemisen käytännön merkitystä.

4.2 Näytemateriaalit

Näytemateriaaleina kolmiaksiaalikoikeissa käytettiin kahta uutta raidesepeliä, kahta tukikerroksen puhdistuksen yhteydessä rataan palautettua raidesepeliä, kahta tukikerroksen puhdistuksen yhteydessä hylättyä jätesepeleitä sekä näiden erilaisia seoksia. Uudet raidesepelet olivat Loimaan louhoksella tuotettu Toijala-Turku rataosan täydennyssepele ja Orivedellä tuotettu Tampere-Jämsänkoski rataosalla käytetty täydennyssepele. Rataan palautetut raidesepelet ja hylkysepelet haettiin sepelinpuhdistustyön aikana rataosilta Toijala-Turku km 263+080 (hylkysepele km 264+980) ja Kuopio-Siilinjärvi km 470+490. Yhteen kokeeseen vaadittu materiaalmäärä vaihteli välillä 66–94 kg. Koesarjan läpiviemiseksi ja haluttujen rakeisuuksien aikaansaamiseksi tarvittu kiviainesten kokonaismäärä oli siten useita tonneja.

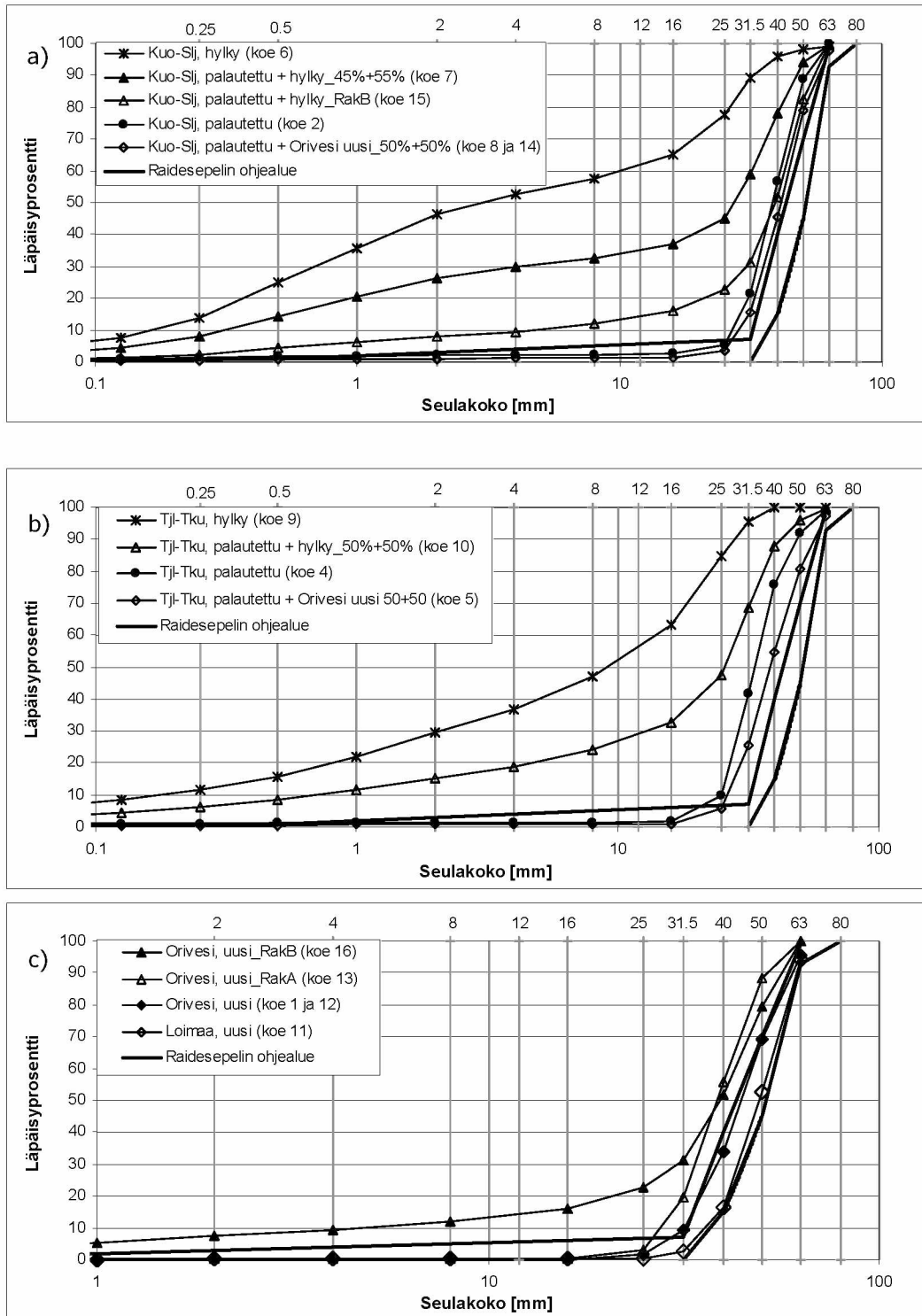
Kolmiaksiaalikoikeissa käytettyjen materiaalien tunnistet on kuvattu taulukossa 4.1. Koe 3 puuttuu numeroinnista, koska kyseinen koe epäonnistui näytettä ympäröivän kumin (ks. luku 4.3) rikkouduttua esikuormitusvaiheessa. Materiaalin nimeämisessä ensimmäinen tunnus kuvaa sitä, onko sepele uutta (U), rataa puhdistuksen yhteydessä palautettua (P) vai puhdistuksessa tuotettua hylkysepeleitä (H). Tunni-teen seuraava osa (Ori, Loi, Kuo, Tjl tai Mix) on lyhenne materiaalin alkuperästä.

Tunnisteen lopun numerotunnus kuvaa materiaalien osuuksia näytteessä. Numeroosan korvaava RakA tai RakB ilmentää rakeisuuden olevan keinotekoisesti rakennettu.

Taulukko 4.1. Kokeissa käytetyt materiaalit, niille lasketut rakeisuusluvut (1 mm, 8 mm ja 25 mm seulojen läpäisyprosenttien summa) ja tunnisteiden selitteet.

Koe nro	Materiaalin tunniste	Rakeisuus-luku	Tunnisteiden selitteet
Koe 1	U_Ori_100	2	U = uusi P = palautettu H = hylky Ori = Orivesi (uusi) Loi = Loimaa (uusi) Kuo = Kuo-Slj rataosa (palautettu tai hylky) Tjl = Tjl-Tku rataosa (palautettu tai hylky) Mix = Uusien sepeleiden seos (Ori & Oikorata) luku = materiaalin prosenttiosuus näytteessä RakA = rakennettu rakeisuus A RakB = rakennettu rakeisuus B
Koe 2	P_Kuo_100	9	
Koe 4	P_Tjl_100	13	
Koe 5	U+P_Ori+Tjl_50+50	8	
Koe 6	H_Kuo_100	171	
Koe 7	P+H_Kuo_45+55	98	
Koe 8	U+P_Ori+Kuo_50+50	6	
Koe 9	H_Tjl_100	154	
Koe 10	P+H_Tjl_50+50	83	
Koe 11	U_Loi_100	1	
Koe 12	U_Ori_100	2	
Koe 13	U_Ori_RakA	4	
Koe 14	U+P_Ori+Kuo_50+50	6	
Koe 15	P+H_Kuo_RakB	40	
Koe 16	U_Mix_RakB	40	

Kokeissa 1, 2, 4, 6, 9, 11 ja 12 näytemateriaalien rakeisuus vastasi kyseisen materiaalin luontaista rakeisuutta, josta oli poistettu yli 63 mm rakeet. Vastaavasti kokeissa 5, 7, 8, 10 ja 14 rakeisuus oli materiaalien seossuhteiden tuloksena syntyneen luontaisen rakeisuuden mukainen (<63 mm). Kokeissa 13, 15 ja 16 rakeisuus rakennettiin halutun mukaiseksi mahdollistamaan rakeisuudesta riippumattomien materiaaliominaisuuksien tarkastelu. Materiaalien luontaiset, seossuhteiden tuloksena syntyneet ja rakennetut rakeisuuskäyrät on esitetty kuvassa 4.1.



Kuva 4.1. Testattujen materiaalien rakeisuuskäyrät. Yläkuvassa Kuo-Slj rataosan materiaali, keskimmaisessä Tjl-Tku rataosan materiaali ja alimmassa Oriveden ja Loimaan uudet kiviainekset. Huomaa alakuvan vaakakselin erilainen asteikko.

Kokeissa käytetyt näytemateriaalit voidaan jaotella hienorakeisimmasta karkearakeisimpaan seuraavasti:

- 1) Hienorakeisimpia olivat pelkästä *hylkysepelistä* koostuneet näytemateriaalit H_Kuo_100 ja H_TjL_100 (kokeet 6 ja 9). Materiaaleissa oli noin 80 % raekooltaan alle 25 mm ainesta. Rakeisuusluvut olivat 171 (Kuo-Slj) ja 154 (TjL-Tku). Rakeisuuskäyrien vertailusta (kuva 4.1) havaitaan, että Kuo-Slj hylkysepelissä on runsaasti lajitetta 0,25-2 mm, mikä aiheuttaa patin rakeisuuskäyrään.
- 2) Tyypillistä *rakeisuutta tukikerroksen elinkaaren lopussa, puhdistusrajalla*, kuvasivat rataan palautetun ja hylkysepin seokset P+H_Kuo_45+55 ja P+H_TjL_50+50 (kokeet 7 ja 10). Kyseiset rakeisuudet vastasivat rakeisuuslukuja 98 (Kuo-Slj) ja 83 (TjL-Tku).
- 3) *Lievemmin hienontunutta sepeliä* kuvaamaan valittiin kokeisiin 15 ja 16 rakennettu rakeisuus (RakB), joka vastasi rakeisuuslukua 40.
- 4) Selvästi tasarakeisempia ja edellä mainittuja karkearakeisempia näytemateriaaleja olivat *pelkästään rataan palautetusta sepelistä* koostuneet näytemateriaalit P_Kuo_100 ja P_TjL_100 (kokeet 2 ja 4), joissa rakeisuusluvut olivat 13 (TjL-Tku) ja 9 (Kuo-Slj). Rakeisuuskäyrästä (kuva 4.1) havaitaan, että rataa palautetuista sepeleistä Kuo-Slj rataosan näytemateriaali oli karkearakeisempaa kuin TjL-Tku rataosan näytemateriaali.
- 5) Tyypillistä *sepin puhdistuksen ja täydennyssepelöinnin jälkeistä tukikerroksen rakeisuutta* kuvasivat rataa *palautettujen ja uuden sepin seokset* U+P_Ori+TjL_50+50 (koe 5) ja U+P_Ori+Kuo_50+50 (kokeet 8 ja 14). Rakeisuusluvut olivat 8 (TjL-Tku) ja 6 (Kuo-Slj).
- 6) *Pelkästä uudesta sepelistä* koostuneista näytemateriaaleista Loimaan rakeisuuskäyrä sijoittuu juuri raidesepin rakeisuusohjealueen karkearakeisen puolen rajalle ja Oriveden materiaalin käyrä ohjealueen hienorakeisen puolen rajalle.

Koemateriaalit ja niiden rakeisuuksien valinta pyrittiin tekemään siten, että kokeista oli mahdollista muodostaa ryhmiä, joiden sisällä muut parametrit olivat oleellisilta osiltaan vakioitu ja ryhmään kuuluvien kokeiden tuloksista voitiin vertailla joko rakeisuuden, rakeiden kuluneisuuden tai kiviaineksen merkitystä muodonmuutokäyttäytymisessä. Näin muodostetut kokeiden vertailuryhmät esitetään tulosten tarkastelun yhteydessä luvussa 4.5.1.

4.3 Kolmiaksaalikoejärjestely

TTY:n Rakennustekniikan laitoksen Maa- ja pohjarakenteiden yksikön käytössä olevaa suurikokoista dynaamista kolmiaksaalikoejärjestelyä (kuva 4.2) on käytetty aktiivisesti 15 vuotta erilaisten karkearakeisten kiviainesten muodonmuutosominaisuuksien tarkasteluissa. Raidesepin rakeisuutta vastaaville materiaaleille ei kuitenkaan aikaisemmin ole tehty systemaattisia koesarjoja. Laitteiston toiminta-periaatetta, mittaustekniikkaa ja muita teknisiä ominaisuuksia on kuvattu tarkemmin

aiemmissa julkaisuissa (esim. Kolisoja 1997). Tässä yhteydessä tyydytään kuvaamaan suppeasti näytteen valmistelun ja koejärjestelyn yleispiirteet sekä kuormitustapa ja käytetyt kuormitusproseduurit.



Kuva 4.2. TTY:n dynaaminen kolmiaksisiaalikoelaitteisto, joka mahdollistaa 300 mm näytehalkaisijan ja 600 mm näytekorkeuden.

Kuormituskoenäytteiden halkaisija oli 300 mm ja korkeus 600 mm. Miniminäytekoolle on usein esitetty vaatimus, jonka mukaan näytehalkaisijan tulee olla maksimiraekokoon nähden vähintään 5-kertainen. Tasarakeisessa materiaalissa näytekoon on suositeltavaa olla tätäkin suurempi, jopa 10-kertainen maksimiraekokoon nähden. Testattujen materiaalien maksimiraekoko oli 63 mm, joten näytehalkaisija oli siihen nähden 4,8-kertainen. Hyvin karkea- ja tasarakeisena materiaalina raidesevelissä jännitykset keskittyvät voimakkaasti tiettyihin raekontaktiketjuihin, minkä johdosta näytekoon merkitys korostuu. Kokeissa sovellettua suurikokoisempaa koelaitteistoa ei kuitenkaan ollut mahdollista tässä yhteydessä käyttää. Ulkomaillakin niitä tiedetään olevan vain Ruotsin KTH:ssa ja Norjan NGI:ssa (Skoglund 2002).

Kuormituskoenäytteiden valmistelussa näytemateriaali tiivistettiin vakioidulla menettelyllä sisähalkaisijaltaan 300 mm teräsmuottiin kuudessa noin 100 mm kerroksessa. Näytemateriaali jaettiin ja tarvittaessa suhteistettiin valmiiksi kuuteen erään, jolloin rakeisuus saatiin tasalaatuiseksi näytteen pystysuunnassa. Ennen muottiin asennusta materiaaalierät kastettiin suihkupullolla vesipitoisuuteen, jonka materiaali silmämääräisesti arvioiden kykeni pidättämään. Tiivistyksessä käytettiin painoltaan noin 1,2 kN tärytintä, jonka tärytyslevyn halkaisija oli noin 295 mm. Tärytysaika kullekin kerrokselle oli 20 sekuntia. Näytteiden valmistustiedot on kuvattu taulukossa 4.2.

Taulukko 4.2. Kolmiaksaalikoenäytteiden valmistustiedot.

Koe nro	Materiaali	Näyte- korkeus (mm)	Kuivairto- tiheys (t/m ³)	Vesipitoisuus (%)	Esikuormitus- sykliä lukumäärä
Koe 1	U_Ori_100	611	1.59	0.6	5000
Koe 2	P_Kuo_100	597	1.77	0.9	5020
Koe 4	P_TjL_100	600	1.70	1.3	4460
Koe 5	U+P_Ori+TjL_50+50	597	1.62	0.8	19080
Koe 6	H_Kuo_100	600	2.20	2.6	4200
Koe 7	P+H_Kuo_45+55	593	2.22	2.0	6010
Koe 8	U+P_Ori+Kuo_50+50	589			6110
Koe 9	H_TjL_100	602	2.13	4.0	5000
Koe 10	P+H_TjL_50+50	602	2.19	4.2	5000
Koe 11	U_Loi_100	594	1.59	0.4	6180
Koe 12	U_Ori_100	599	1.58	0.7	6000
Koe 13	U_Ori_RakA	599	1.57	0.6	7000
Koe 14	U+P_Ori+Kuo_50+50	595	1.64	0.8	6000
Koe 15	P+H_Kuo_RakB	595	1.97	2.0	5010
Koe 16	U_Mix_RakB	595	1.83	2.0	4200

Tiivistetty näyte saatiin asennettua halkaisijaltaan 300 mm ja paksuudeltaan 2 mm kumimembraanin sisään aiemmissa tutkimuksissa (Kolisoja 1997) kehitetyllä tekniikalla siten, että näytettä puristettiin hydraulisynterin avulla hitaasti ulos sullontamuotista rullaten kumia samanaikaisesti muotista vapautuvan näytemateriaalin ympärille.

Kumimembraanin ympäröimän näytemateriaalin pinnalle kiinnitettiin kumin läpi neljä siirtymäanturia, jotka mittasivat pystysuuntaista muodonmuutosta keskimäisen 200 mm näytekorkeudelta. Näin mittauksessa voitiin välttää näytteen päätyosien ja kuormitusjärjestelmän jouston aiheuttama muodonmuutosten vääristymä. Suoraan näytteestä tehtyjen mittausten lisäksi mitattiin tulosten tulkinnan avuksi kuitenkin myös koko näytteen pystysuuntaista muodonmuutosta kahdella koeseinän ulkopuolisella anturilla.

Instrumentoitu näyte suljettiin koeseinän sisään. Koejärjestelyssä näytteeseen kohdistuvaa vaakajännitystä säädellään koeseinän sisällä vaikuttavan ilmanpaineen avulla ja pystysuuntainen kuormitus tapahtuu servo-ohjatulla hydraulisynterillä. Kutakin näytettä esikuormitettiin standardin SFS-EN 13286-7 'low stress level' mukaisessa jännitystilassa, eli 70 kPa vakiosellipaineessa 200 kPa pystysuuntaisella kuormituspulssilla. Esikuormitusta jatkettiin vähintään niin kauan, että 1000 kuormitus syklin vaikutuksesta tapahtunut näytteen kokonaispainuma oli alle 0,1mm, mikä vastasi 0,017 % muodonmuutosta. Toteutuneet esikuormitus syklien määrät vaihtelivat välillä 4200–7000 (taulukko 4.2) pois lukien koe 5, jossa esikuormitusta jatkettiin em. kriteerin täyttymisestä huolimatta 19000 kuormitus sykliin.

Esikuormituksen jälkeen määritettiin resilienssi-moduuli standardin SFS-EN 13286-7 'low stress level'-tilan mukaisilla (taulukko 4.3) jännityksillä kuitenkin siten, että standardissa esitetyt kaksi suurinta sellipainetta (100 kPa ja 150 kPa) jätettiin kuormittamatta. Tällä pyrittiin varmistamaan se, että näytemateriaalit eivät vielä tässä vaiheessa koe suurta pysyviä muodonmuutoksia, joita oli tarkoitus tarkastella

moduulimäärityksen jälkeisissä pitkissä kuormitussarjoissa. Kussakin sarjassa ajettiin standardin mukaisesti 100 kuormitus sykliä.

Taulukko 4.3. Palautuvan muodonmuutoksen tarkastelussa käytetty SFS-EN 13286-7 mukainen kuormitusproseduuri. Kussakin sarjassa ajettiin 100 kuormitus sykliä.

Sarja nro	Sellipaine, σ_3 (kPa)	Kuormituspulssi (kPa)	
		$q_{\min} = \sigma_{1\min} - \sigma_3$	$q_{\max} = \sigma_{1\max} - \sigma_3$
1	20	0	20
2	20	0	35
3	20	0	50
4	20	0	70
5	35	0	35
6	35	0	50
7	35	0	70
8	35	0	90
9	35	0	120
10	50	0	50
11	50	0	70
12	50	0	90
13	50	0	120
14	50	0	160
15	70	0	70
16	70	0	90
17	70	0	120
18	70	0	160
19	70	0	200

Moduulimääritykseen sovellettujen kuormitussarjojen jälkeen tarkasteltiin näyttemateriaalien pysyviä muodonmuutoksia moniportaisessa syklisessä kuormituksessa. Moniportainen kuormitus aloitettiin taulukon 4.4 mukaisesti 45 kPa vakiosellipaineella ja 150 kPa kuormituspulssilla, jota toistettiin 10000 kertaa. Tämän jälkeen siirryttiin seuraavaan (195 kPa) kuormituspulssiin. Näin edeten kutakin kuormituspulssia toistettiin 10000 sykliä tai kunnes kyseisellä sellipaineella oli syntynyt noin 0,6 % pysyvä pystysuuntainen muodonmuutos. Muodonmuutosrajan ylityttyä siirryttiin taulukon 4.4 mukaisesti seuraavaan (70 kPa) sellipaineeseen, jossa kuormitussarjat etenivät vastaavalla tavalla ja lopulta siirryttiin 100 kPa sellipaineeseen.

Taulukko 4.4. Pysyvien muodonmuutosten tarkasteluun kaavailtu ja toteutunut kuormitusproseduuri. Kussakin sarjassa ajettiin 10000 kuormitus sykliä tai kunnes kyseisellä sellipaineella oli syntynyt noin 0,6 % pysyvä muodonmuutos.

Sarja nro	Sellipaine, σ_3 (kPa)	Tavoiteltu kuormituspulssi (kPa)		Toteutunut kuormituspulssi (kPa)	
		$q_{\min} = \sigma_{1\min} - \sigma_3$	$q_{\max} = \sigma_{1\max} - \sigma_3$	$q_{\min} = \sigma_{1\min} - \sigma_3$	$q_{\max} = \sigma_{1\max} - \sigma_3$
1	45	0	150	25	175
2	45	0	195	29	224
3	45	0	240	33	273
4	45	0	285	37	322
5	45	0	330	39	369
6	70	0	200	26	226
7	70	0	260	29	289
8	70	0	320	34	354
9	70	0	380	38	418
10	70	0	440	40	480
11	100	0	250	27	277
12	100	0	325	31	356
13	100	0	400	34	434
14	100	0	475	39	514
15	100	0	500	43	543

Taulukon 4.4 mukaiset tavoitteelliset kuormitustasot on valittu standardissa SFS-EN 13286-7 moniportaiselle kuormitukselle esitettyjen 'high stress level' ja 'low stress level' kuormitustasojen puolivälistä. Ero toteutuneisiin kuormituspulssihin oli seurausta koeteknisestä muutoksesta, jonka havaitsemisen jälkeen kuormituspulssia ei ollut mielekäästä muuttaa kesken koesarjan. Poikkeuksena tähän on ennen koeteknistä muutosta tehty koe 1, jossa toteutunut kuormituspulssi vastasi tavoiteltua. Muilta osin kuormituspulssit poikkesivat eri kokeissa enintään 2 % taulukon 4.4 mukaisesta toteutuneen kuormituspulssin maksimista ja nämä erot jätettiin huomioitta tulosten tarkastelussa.

4.4 Tulosten tarkastelu ja kokeiden vertailuryhmät

Kokeet voidaan jaotella materiaalien perusteella taulukon 4.5 mukaisiin ryhmiin, joiden sisällä on mielekäästä vertailla koetuloksia ja tarkastella eri tekijöiden vaikutusta havaittuun muodonmuutuskäyttäytymiseen. Kokeet 1 ja 12 (U_Ori_100) tehtiin samalle materiaalille, Oriveden uudelle sepelille luontaisella rakeisuudella. Vastaavasti kokeissa 8 ja 14 (U+P_Ori+Kuo_50+50) materiaali oli sama, Oriveden uuden sepelin ja Kuo-Slj rataosalla rataa palautetun sepelin seos suhteessa 50%/50%. Molemmissa tapauksissa uusintakokeet (12 ja 14) tehtiin, koska alkuperäisissä kokeissa (1 ja 8) näytettä ympäröivä kumi rikkoontui kokeen loppupuolella. Kokeiden

alkuosia voidaan kuitenkin käyttää rinnakkaisnäytteiden myötä materiaalista riippumattoman satunnaisvaihtelun tarkasteluun.

Taulukko 4.5. Kokeiden jaottelu ryhmiin, joissa on mielekästä tarkastella 1) kokeen toistettavuutta sekä 2) rakeisuuden, 3) rakeiden kuluneisuuden ja 4) kiviaineksen merkitystä kolmiaksoalikoikeissa havaittuun muodonmuutokäyttäytymiseen.

1) TOISTETTAVUUS			
Ryhmä A:		Ryhmä B:	
Koe 1	U_Ori_100	Koe 8	U+P_Ori+Kuo_50+50
Koe 12	U_Ori_100	Koe 14	U+P_Ori+Kuo_50+50
2) RAKEISUUS			
Ryhmä A: Kuo-Slj (+ Orivesi)		Ryhmä B: Tjl-Tku (+ Orivesi)	
Koe 12 & 1	U_Ori_100	Koe 12 & 1	U_Ori_100
Koe 14 & 8	U+P_Ori+Kuo_50+50	Koe 5	U+P_Ori+Tjl_50+50
Koe 2	P_Kuo_100	Koe 4	P_Tjl_100
Koe 15	P+H_Kuo_RakB	Koe 10	P+H_Tjl_50+50
Koe 7	P+H_Kuo_45+55	Koe 9	H_Tjl_100
Koe 6	H_Kuo_100		
Ryhmä C: Orivesi			
Koe 12 & 1	U_Ori_100		
Koe 13	U_Ori_RakA		
Koe 16	U_Mix_RakB		
3) RAKEIDEN KULUNEISUUS			
Ryhmä A: Rakeisuus A		Ryhmä B: Rakeisuus B	
Koe 2	P_Kuo_100	Koe 15	P+H_Kuo_RakB
Koe 13	U_Ori_RakA	Koe 16	U_Mix_RakB
4) KIVIAINES			
Ryhmä A: Uudet sepelit		Ryhmä B: Uusi/palautettu seokset	
Koe 12 & 1	U_Ori_100	Koe 5	U+P_Ori+Tjl_50+50
Koe 11	U_Loi_100	Koe 14 & 8	U+P_Ori+Kuo_50+50
Ryhmä C: Palautetut sepelit		Ryhmä D: Palautettu/hylky seokset	
Koe 2	P_Kuo_100	Koe 7	P+H_Kuo_45+55
Koe 4	P_Tjl_100	Koe 10	P+H_Tjl_50+50
Ryhmä E: Hylkysepelit			
Koe 6	H_Kuo_100		
Koe 9	H_Tjl_100		

4.5 Tulokset: palautuvat muodonmuutokset

4.5.1 Resilient-moduulin laskenta

Palautuvan muodonmuutoksen tarkastelemiseksi tehdyistä kuormitussarjoista (taulukko 4.3) määritettiin yhtälön 4-1 mukainen resilient-moduuli kunkin sarjan lopussa keskiarvona viideltä viimeiseltä kuormituspulssilta.

$$M_r = \frac{\Delta q}{\Delta \varepsilon_a^e}, \text{ missä} \quad (4-1)$$

M_r	on	resilient-moduuli
Δq	on	syklinen deviatorinen jännitys
$\Delta \varepsilon_a^e$	on	palautuva aksiaalinen muodonmuutos

Materiaalin resilient-moduuli riippuu ratkaisevasti tarkasteltavasta jännitystilasta. Yleinen tapa kuvata resilient-moduulin jännitystilariippuvuutta on yhtälön 4-2 mukainen niin sanottu $k\theta$ -malli.

$$M_r = k_1 \theta_0 \left(\frac{\theta}{\theta_0} \right)^{k_2}, \text{ missä} \quad (4-2)$$

M_r	on	resilient-moduuli
θ	on	pääjännitysten summa, deviatorisen jännityksen maksimiarvolla
θ_0	on	vertailujännitys, 100 kPa
k_1	on	materiaalikohtainen parametri (moduuliluku)
k_2	on	materiaalikohtainen parametri (jännityseksponentti)

Kunkin kokeen osalta resilient-moduulit on kuvattu pääjännitysten summan suhteen liitteessä B, jossa samoissa koordinaatistoissa on esitetty myös pitkissä sarjoissa mitattuja resilient-moduuliarvoja (vrt. luku 4.5.6). Yhtälön 4-2 mukaisten materiaali-parametrien arvot kullekin testatulle materiaalille on esitetty taulukossa 4.6. Taulukkoon on laskettu myös eri pääjännitysten summia vastaavat yhtälön 4-2 mukaiset resilient-moduulin arvot. Yleisesti voidaan todeta, että $k\theta$ -malli vastasi hyvin kokeissa havaittua käyttäytymistä. Edelleen yleisellä tasolla tarkasteltuna materiaali-parametreista jännitysriippuvuutta kuvaavan k_2 :n arvot ovat jonkin verran suurempia kuin Kolisojan (1994, 1996, 1997, 1998) laajassa aineistossa, joka käsittää erityisesti tierakenteen kantavan ja jakavan kerroksen materiaaleja, mutta myös lähes rataan palautetun raideseppelin rakeisuuden omaavia materiaaleja.

Eri materiaalien keskinäisen vertailun mahdollistamiseksi taulukon 4.6 tuloksista laskettiin kullekin materiaalille suhteellinen ero, jonka verran sen mallinnettu resilient-moduuli oli tarkastelluista materiaaleista heikointa, kokeen 9 materiaalia suurempi. Taulukon 4.7 perusteella tarkastelluista materiaaleista suurimman resilient-moduulin omaavan Loimaan uuden sepelin (koe 11) resilient-moduuli oli pääjännitysten summavälillä 100–400 kPa keskimäärin 136 % suurempi kuin heikoimmalla Tjl-Tku rataosan hylkysepellillä (koe 9).

Taulukko 4.6. Yhtälön 4-2 mukaisen mallin materiaaliparametrit k_1 ja k_2 eri kokeissa ja parametreja vastaavat resilient-moduulit eri pääjännitysten summilla (θ).

Koe nro	Materiaali	Yhtälön 4-2 parametrit		Kaavan 4-2 mukainen M_r (MPa), kun			
		k_1	k_2	$\theta = 100$ kPa	$\theta = 200$ kPa	$\theta = 300$ kPa	$\theta = 400$ kPa
Koe 1	U_Ori_100	2132	0.680	213	342	450	547
Koe 2	P_Kuo_100	1653	0.645	165	258	336	404
Koe 4	P_Tjl_100	1399	0.804	140	244	338	427
Koe 5	U+P_Ori+Tjl_50+50	2086	0.839	209	373	524	667
Koe 6	H_Kuo_100	1304	0.614	130	200	256	305
Koe 7	P+H_Kuo_45+55	1331	0.697	133	216	286	350
Koe 8	U+P_Ori+Kuo_50+50	1751	0.894	175	325	467	604
Koe 9	H_Tjl_100	1133	0.691	113	183	242	295
Koe 10	P+H_Tjl_50+50	1401	0.892	140	260	373	483
Koe 11	U_Loi_100	2995	0.543	300	436	544	636
Koe 12	U_Ori_100	1740	0.847	174	313	441	563
Koe 13	U_Ori_RakA	1704	0.757	170	288	391	487
Koe 14	U+P_Ori+Kuo_50+50	1851	0.670	185	294	386	468
Koe 15	P+H_Kuo_RakB	1461	0.731	146	243	326	403
Koe 16	U_Mix_RakB	1445	0.828	145	257	359	455

Taulukko 4.7. Yhtälön 4-2 mukaisesti mallinnettujen resilient-moduulien (taulukko 4.6) vertailu suhteessa heikoimpaan, kokeen 9 materiaaliin eri pääjännitysten summilla (θ) ja kyseisillä θ :n arvoilla keskimäärin.

		Osuus, jonka materiaalin M_r on suurempi kuin kokeessa 9				
		$\theta = 100$ kPa	$\theta = 200$ kPa	$\theta = 300$ kPa	$\theta = 400$ kPa	Keskiarvo
Koe 11	U_Loi_100	164 %	138 %	125 %	115 %	136 %
Koe 5	U+P_Ori+Tjl_50+50	84 %	104 %	117 %	126 %	108 %
Koe 1	U_Ori_100	88 %	87 %	86 %	85 %	87 %
Koe 8	U+P_Ori+Kuo_50+50	55 %	78 %	93 %	105 %	83 %
Koe 12	U_Ori_100	54 %	71 %	82 %	91 %	74 %
Koe 14	U+P_Ori+Kuo_50+50	63 %	61 %	60 %	59 %	61 %
Koe 13	U_Ori_RakA	50 %	57 %	62 %	65 %	59 %
Koe 10	P+H_Tjl_50+50	24 %	42 %	54 %	63 %	46 %
Koe 16	U_Mix_RakB	28 %	40 %	48 %	54 %	43 %
Koe 2	P_Kuo_100	46 %	41 %	39 %	37 %	41 %
Koe 4	P_Tjl_100	23 %	34 %	40 %	44 %	35 %
Koe 15	P+H_Kuo_RakB	29 %	33 %	35 %	36 %	33 %
Koe 7	P+H_Kuo_45+55	17 %	18 %	18 %	18 %	18 %
Koe 6	H_Kuo_100	15 %	9 %	6 %	3 %	8 %
Koe 9	H_Tjl_100					

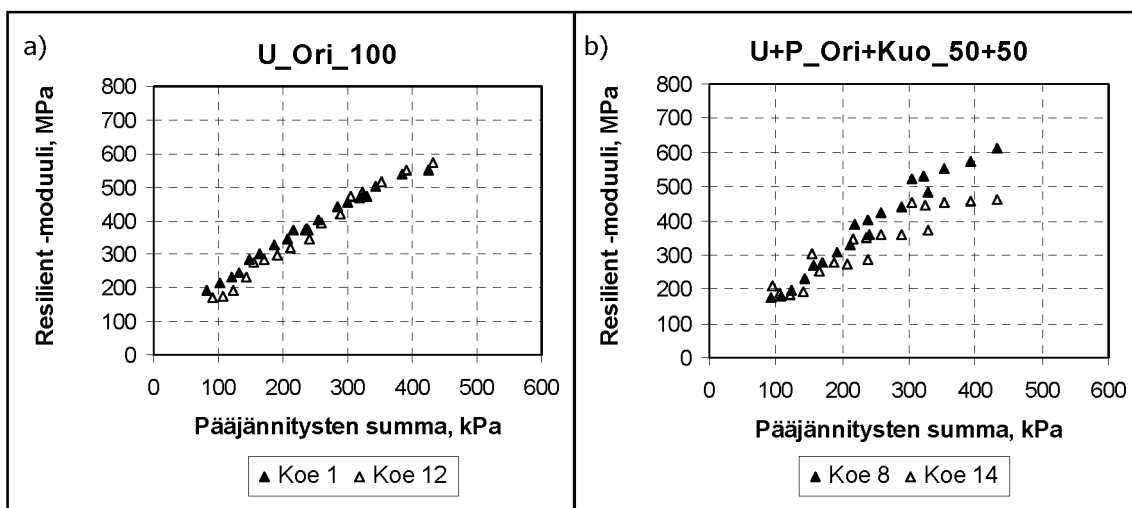
Eri tekijöiden vaikutusta resilient-moduuliin on mielekästä tarkastella luvun 4.4 mukaisesti valikoitujen koeryhmien sisällä. Taulukossa 4.8 on tarkasteltu resilient-moduulien eroja eri vertailuryhmien (taulukko 4.6) sisällä. Taulukossa esitettävät prosenttiarvot kuvaavat sitä, kuinka paljon suurempi kyseisen materiaalin resilient-moduuli on suhteessa vertailuryhmän heikoimpaan materiaaliin. Suhteelliset resilient-moduulin lisäykset on laskettu k₀-mallin mukaisista resilient-moduuleista neljälle eri pääjännitysten summan arvolle. Taulukossa näkyy myös näiden neljän prosenttiosuuden keskiarvo, joka kuvaa yksittäisenä lukuna ehkä parhaiten materiaalin resilient-moduulin lisäystä suhteessa vertailuryhmän heikoimpaan materiaaliin. Taulukon 4.8 eri vertailuryhmissä havaittavia eroja käsitellään tarkemmin seuraavissa luvuissa.

Taulukko 4.8. Resilient-moduulien erot eri vertailuryhmien sisällä.

			Osuus, jonka materiaalin M_r on suurempi kuin vertailuryhmän heikoimmalla (kursivoitu)				
			$\theta = 100$ kPa	$\theta = 200$ kPa	$\theta = 300$ kPa	$\theta = 400$ kPa	Keski- arvo
Toistettavuus:							
Ryhmä A	Koe 1 <i>Koe 12</i>	U_Ori_100 <i>U_Ori_100</i>	23 %	9 %	2 %	-3 %	8 %
Ryhmä B	Koe 8 <i>Koe 14</i>	U+P_Ori+Kuo_50+50 <i>U+P_Ori+Kuo_50+50</i>	-5 %	10 %	21 %	29 %	14 %
Rakeisuus:							
Ryhmä A	Koe 1&12	U_Ori_100	48 %	64 %	74 %	82 %	67 %
	Koe 8&14	U+P_Ori+Kuo_50+50	38 %	55 %	67 %	76 %	59 %
	Koe 2	P_Kuo_100	27 %	30 %	31 %	32 %	30 %
	Koe 15	P+H_Kuo_RakB	12 %	22 %	27 %	32 %	23 %
	Koe 7	P+H_Kuo_45+55	2 %	8 %	12 %	15 %	9 %
	<i>Koe 6</i>	<i>H_Kuo_100</i>					
Ryhmä B	Koe 1&12	U_Ori_100	71 %	79 %	84 %	88 %	80 %
	Koe 5	U+P_Ori+TjL_50+50	84 %	104 %	117 %	126 %	108 %
	Koe 4	P_TjL_100	23 %	34 %	40 %	44 %	35 %
	Koe 10	P+H_TjL_50+50	24 %	42 %	54 %	63 %	46 %
	<i>Koe 9</i>	<i>H_TjL_100</i>					
Ryhmä C	Koe 1&12	U_Ori_100	34 %	28 %	24 %	22 %	27 %
	Koe 13	U_Ori_RakA	18 %	12 %	9 %	7 %	12 %
	<i>Koe 16</i>	<i>U_Mix_RakB</i>					
Rakeiden kuluneisuus:							
Ryhmä A	Koe 13 <i>Koe 2</i>	U_Ori_RakA <i>P_Kuo_100</i>	3 %	11 %	17 %	20 %	13 %
Ryhmä B	Koe 16 <i>Koe 15</i>	U_Mix_RakB <i>P+H_Kuo_RakB</i>	-1 %	6 %	10 %	13 %	7 %
Materiaaliryhmät:							
Ryhmä A	Koe 11 <i>Koe 1&12</i>	U_Loi_100 <i>U_Ori_100</i>	55 %	33 %	22 %	14 %	31 %
Ryhmä B	Koe 5 <i>Koe 8&14</i>	U+P_Ori+TjL_50+50 <i>U+P_Ori+Kuo_50+50</i>	16 %	20 %	23 %	24 %	21 %
Ryhmä C	Koe 2	P_Kuo_100	18 %	6 %	-1 %	-5 %	4 %
	<i>Koe 4</i>	<i>P_TjL_100</i>					
Ryhmä D	Koe 10	P+H_TjL_50+50	5 %	21 %	30 %	38 %	24 %
	<i>Koe 7</i>	<i>P+H_Kuo_45+55</i>					
Ryhmä E	Koe 6	H_Kuo_100	15 %	9 %	6 %	3 %	8 %
	<i>Koe 9</i>	<i>H_TjL_100</i>					

4.5.2 Resilient-moduulimäärityksen toistettavuus raidesepeissä

Materiaalin U_Ori_100 rinnakkaiskokeiden resilient-moduulit vastaavat toisiaan hyvin tarkasti (kuva 4.3a). Materiaalin U+P_Ori+Kuo_50+50 rinnakkaiskokeiden tulokset sitä vastoin poikkevat etenkin suuremmilla sellipaineilla (kuva 4.3b). Kokeessa 14 kullakin sellipaineella kuormituspulssin lisäystä vastaava resilient-moduulin lisäys on kaikki kokeet huomioiden poikkeuksellisen pieni. Tämä viestii siitä, että neljästä muodonmuutoksen mittausturista useampi on ollut kiinnitettynä kohtaan, jossa muodonmuutos on ollut paikallisesti ympäristöään suurempaa. Ajatusta tukevat myös ulkoiset siirtymämittaukset, joista koko näytteelle lasketuissa resilient-moduulissa ei vastaavaa eroa ilmene. Raidesepelein rakeisuuden omaavassa materiaalisissa palautuvien muodonmuutosten paikallinen vaihtelu on hyvin oletettavaa johtuen jännitysten voimakkaasti keskittymisestä tiettyihin raekontaktiketjuihin. Kaikkien kokeiden tulosten tarkastelun pohjalta kuvan 4.3b) mukainen ero kahden rinnakkaisnäytteen välillä edustaa kuitenkin näissäkin rakeisuuksissa todennäköisesti äärilaitaa.

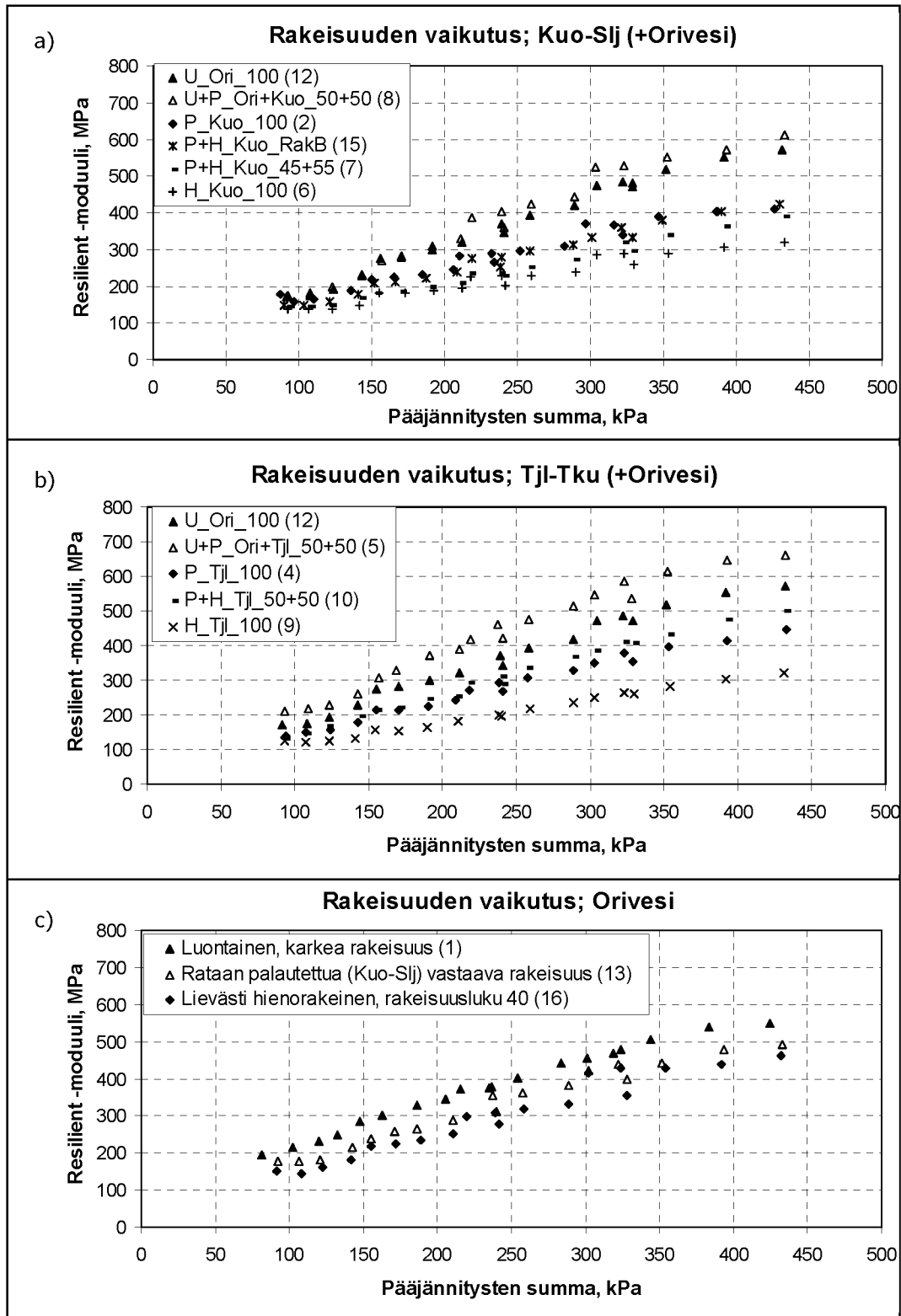


Kuva 4.3. Resilient-moduulin määrittelyn toistettavuuden tarkastelua a) materiaalille U-Ori_100 ja b) U+P_Ori+Kuo_50+50 tehtyjen rinnakkaiskokeiden tuloksista.

Taulukosta 4.8 havaitaan, että k0-mallin mukaan kuvan 4.3a rinnakkaisnäytteistä jäykemmän resilient-moduuli on keskimäärin (välillä $100 \text{ kPa} < \theta < 400 \text{ kPa}$) vain 8 % suurempi kuin heikomman. Kuvan 4.3b näytteissä vastaava ero on 14 %, mutta se kasvaa pääjännitysten summan kasvaessa ja on 29 %, kun $\theta = 400 \text{ kPa}$.

4.5.3 Rakeisuuden vaikutus resilient-moduuliin

Kuvassa 4.4 on esitetty havaitut resilient-moduulit eri rakeisuuksilla tehdyissä kokeissa erikseen Kuo-Slj rataosan, Tjl-Tku rataosan ja Oriveden materiaalien vertailuryhmissä. Kuo-Slj ja Tjl-Tku rataosien materiaaleja koskeissa kuvissa näkyy myös vertailuna koe, jossa kyseisellä rataosalla rataa palautettuun materiaaleihin on lisätty uutta Oriveden sepeliä sekä pelkkä uuden Oriveden sepelin koe. Nämä uutta raidesepeleitä sisältävät kokeet eivät siten ole pelkästään rakeisuuden vaikutuksen vertailuun soveltuvia, koska niissä myös mm. raemuoto ja rakeiden pinnan karkeus poikkeaa kuluneesta materiaalista.



Kuva 4.4. Tarkastelua rakeisuuden vaikutuksesta resilient-moduuliin a) rataosan Tjl-Tku materiaalissa, b) rataosan Kuo-Slj materiaalissa ja c) uudessa Oriveden sepelissä. a) ja b)-kuvin on mukana myös kokeet, joissa materiaaleihin on 'täydennyssepinä' lisätty Oriveden uutta sepeliä sekä pelkälle Oriveden uudelle sepelille tehty koe. Selitteessä materiaalit ovat järjestyksessä karkearakeisimmasta hienorakeisimpaan. Koenumero on sulkeissa selitteen perässä.

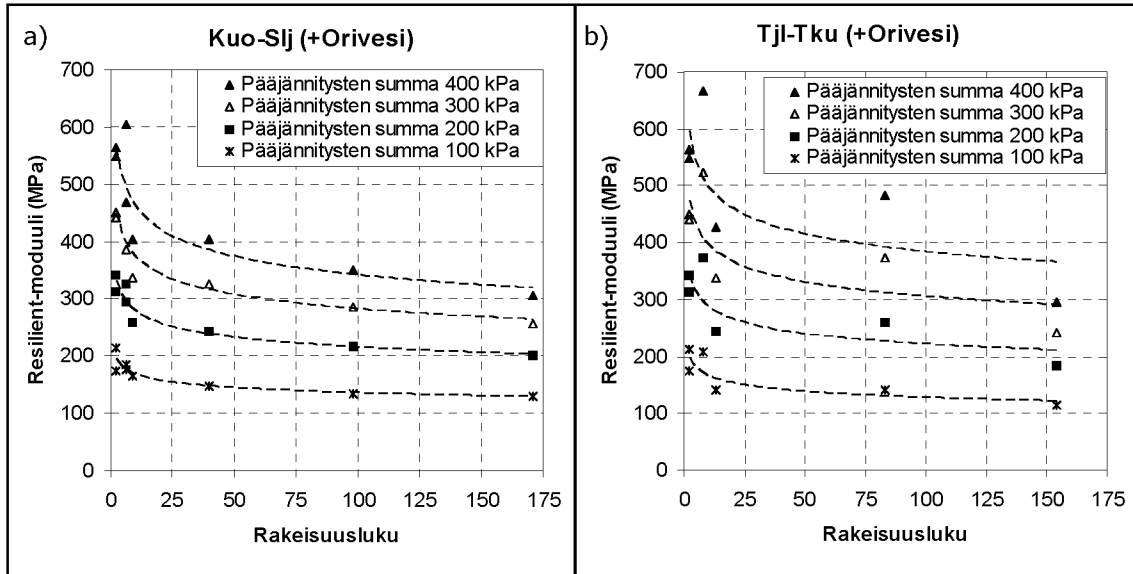
Rakeisuuden vaikutus resilient-moduuliin näkyy kuvista 4.4a-c erittäin hyvin. Kuvien selitteen mukainen järjestys karkearakeisimmasta materiaalista hienorakeisimpaan (vrt. luku 4.2) vastaa kussakin materiaalissa suurelta osin järjestystä suurimmasta resilient-moduulista pienimpään. Uudelle sepelille sekä uuden ja rataa palautetun sepelin seoksille tehdyissä kokeissa resilient-moduuli oli selvästi suurin kuitenkin niin, että uuden ja Tjl-Tku rataosalla rataa palautetun sepelin seos oli vielä selvästi jäykempi kuin pelkkä uusi sepeli. Tämä saattaa viestiä sitä, että kyseisen seoksen raekokojakautuma on jäykkyyden kannalta parempi kuin uuden sepelin raekokojakautuma. Hieman avoimen kysymyksen tähän selvästi jäykimmäksi osoittautuneen materiaalin (koe 5) tulokseen jättää kuitenkin se, saattoiko käyttäytymiseen vaikuttaa esikuormitus, joka oli juuri tässä kokeessa syklimäärältään noin kolminkertainen muihin kokeisiin verrattuna (vrt. taulukko 4.2).

Sekä Kuo-Slj että Tjl-Tku rataosien materiaaleissa selvästi heikoimmat resilient-moduulit saavutettiin hylkysepeleä vastaavalla rakeisuudella. Taulukosta 4.8 nähdään, että rataa palautetun sepelin rakeisuudella resilient-moduuli oli noin 30–35 % suurempi kuin hylkysepelillä. Vastaavasti Oriveden uuden sepelin resilient-moduuli oli keskimäärin 67–80 % suurempi kuin hylkysepelillä. Suurin resilient-moduuli Tjl-Tku rataosalla rataa palautetun ja uuden sepelin seoksessa oli keskimäärin 108 % suurempi kuin Tjl-Tku rataosan hylkysepelissä.

Em. karkearakeisuuden mukaisesta järjestyksestä lievästi poikkesi Tjl-Tku rataosan materiaalin tukikerroksen puhdistusrajaa vastaava rakeisuus, jolla jäykkyys oli jopa hieman suurempi kuin rataa palautetun sepelin rakeisuudella. Toisaalta ero näiden rakeisuuksien resilient-moduuleissa ei ollut suuri myöskään Kuo-Slj rataosan materiaaleissa. Tämä viestii siitä, että rataa palautettujen pyöristyneiden rakeiden muodostaman materiaalin jäykkyys ei ole ilman täydentävää uutta terävasärmäistä materiaalia oleellisesti parempi kuin hienontuneella tukikerrosmateriaalilla ennen sepelinpuhdistusta.

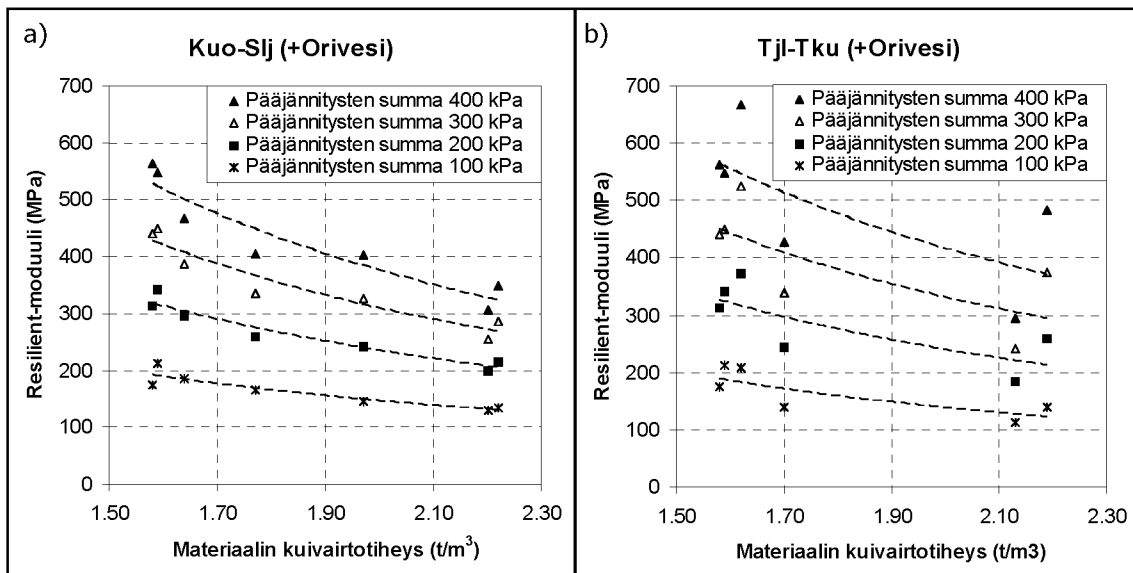
Myös uuden Oriveden raideseppelin osalta rakeisuuden merkitystä voidaan tarkastella kolmesta kokeesta (kuva 4.4c). Resilient-moduulien erot ovat suhteellisen vähäisiä verrattaessa uuden sepelin ohjealueen alarajan mukaista materiaalin luontaista rakeisuutta, rataa Kuo-Slj rataosalla palautetun sepelin rakeisuutta ja rakeisuusluku 40 vastaavaa rakeisuutta. Rakeisuuden vaikutussuunta on kuitenkin aiemmin esitettyjä havaintoja vastaava, eli resilient-moduuli alenee hienorakeisen aineksen määrään kasvaessa ja kaikkein karkeamman lajitteen osuuden vähentyessä. Myös ERRI (1994) totesi 262 mm näytehalkaisijalla tehtyjen kolmiakσιαalikokeiden tuloksena raideseppelin resilient-moduulin alenevan materiaalin hienontuneisuuden lisääntyessä.

Hienontuneisuuden vaikutus raideseppelin resilient-moduuliin käy ilmi kuvan 4.5 tarkastelussa, jossa resilient-moduulin arvoina on käytetty taulukossa 4.6 esitettyjä, k θ -mallin mukaisesti eri pääjännitysten summille laskettuja arvoja. Kuo-Slj rataosan materiaalien vertailuryhmässä (sisältäen Oriveden uudelle sepelille tehdyn kokeen) resilient-moduulin yhteys materiaalin rakeisuuslukuun on erinomaisen hyvä (kuva 4.5a). Tjl-Tku rataosan materiaaleilla yhteys on epämääräisempi, mutta periaatteellinen vaikutussuunta on sama. Resilient-moduuli on suuri uudella tai erittäin vähän hienorakeista ainesta sisältävällä sepelillä. Moduuli pienenee aluksi nopeasti rakeisuusluvun kasvaessa, mutta rakeisuusluvun edelleen lisääntyessä resilient-moduulin alentuminen hidastuu.



Kuva 4.5. Resilient-moduulin yhteys sepelin rakeisuuslukuun a) Kuo-Slj rataosan b) Tjl-Tku rataosan materiaaleille tehdyissä kokeissa. Molemmissa kuvissa on mukana myös kokeet, joissa materiaaleihin on 'täydennys-sepelinä' lisätty Oriveden uutta sepeliä sekä pelkälle Oriveden uudelle sepelille tehty koe.

Epäsuorasti rakeisuuden merkitystä resilient-moduuliin ilmentää myös näyttemateriaalin valmistuksen jälkeisen kuivairtitiheyden suhteen tehty kuvan 4.6 tarkastelu. On syytä korostaa, että suuria resilient-moduulin arvoja vastaavat alhaiset kuivairtitiheydet eivät ilmennä löyhää tiivistystä, vaan lähinnä materiaalin karkea- ja tasarakeisuuden myötä suurta huokoisuutta. Tiivistystyö oli kaikissa kokeissa sama (vrt. luku 4.3).

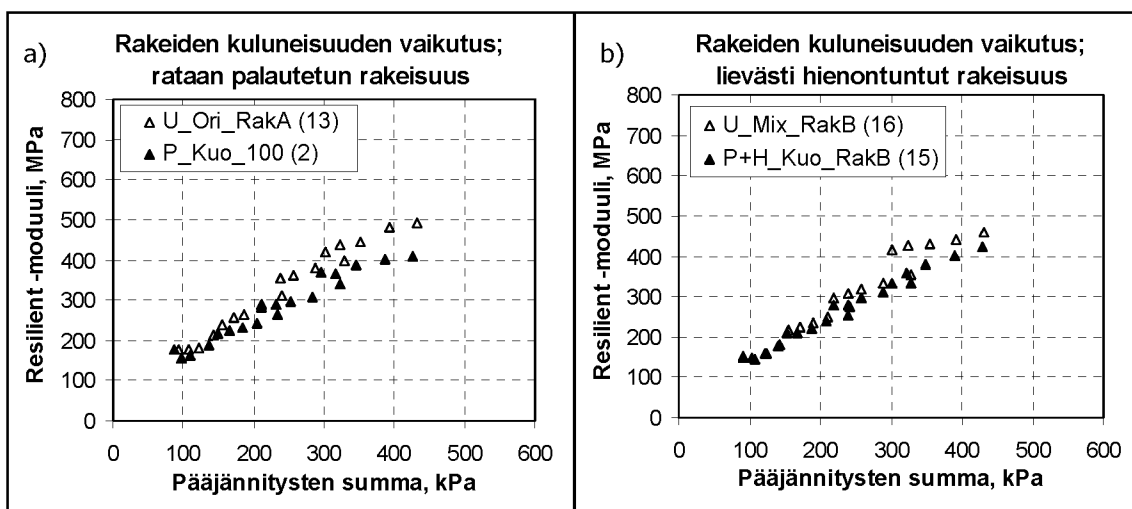


Kuva 4.6. Resilient-moduulin yhteys eri rakeisuuksien omaavien sepeleiden kuivairtitiheyteen a) Kuo-Slj rataosan b) Tjl-Tku rataosan materiaaleille tehdyissä kokeissa. Molemmissa kuvissa on mukana myös kokeet, joissa materiaaleihin on 'täydennys-sepelinä' lisätty Oriveden uutta sepeliä sekä pelkälle Oriveden uudelle sepelille tehty koe. Alhainen irtotiheys ei näyttemateriaalien rakeisuuseroista johtuen ilmennä löyhää näytettä.

4.5.4 Rakeiden kuluneisuuden vaikutus resilient-moduuliin

Rakeiden kuluneisuuden vaikutuksen tarkastelua hankaloitti se, että uuden ja radassa hienontuneen raidesepelin rakeisuuksia oli vaikea saada eri kiviaineksilla samaksi. Uusissa sepeleissä ei juurikaan ollut hienorakeista ainesta ja vanhoissa sepeleissä vastaavasti ei ollut tarpeeksi suuria raekokoja. Tarkastelua varten saatiin kuitenkin rakennettua kaksi vertailurakeisuutta, joilla tehtiin koe sekä uudella Oriveden sepelillä että Kuo-Slj rataosan materiaalilla. Näistäkin vertailuista toisessa (koe 16) uutta Oriveden sepeleä jouduttiin täydentämään toisesta vastamurskatusta kalliomurskeesta peräisin olevalla hienorakeisella aineksella.

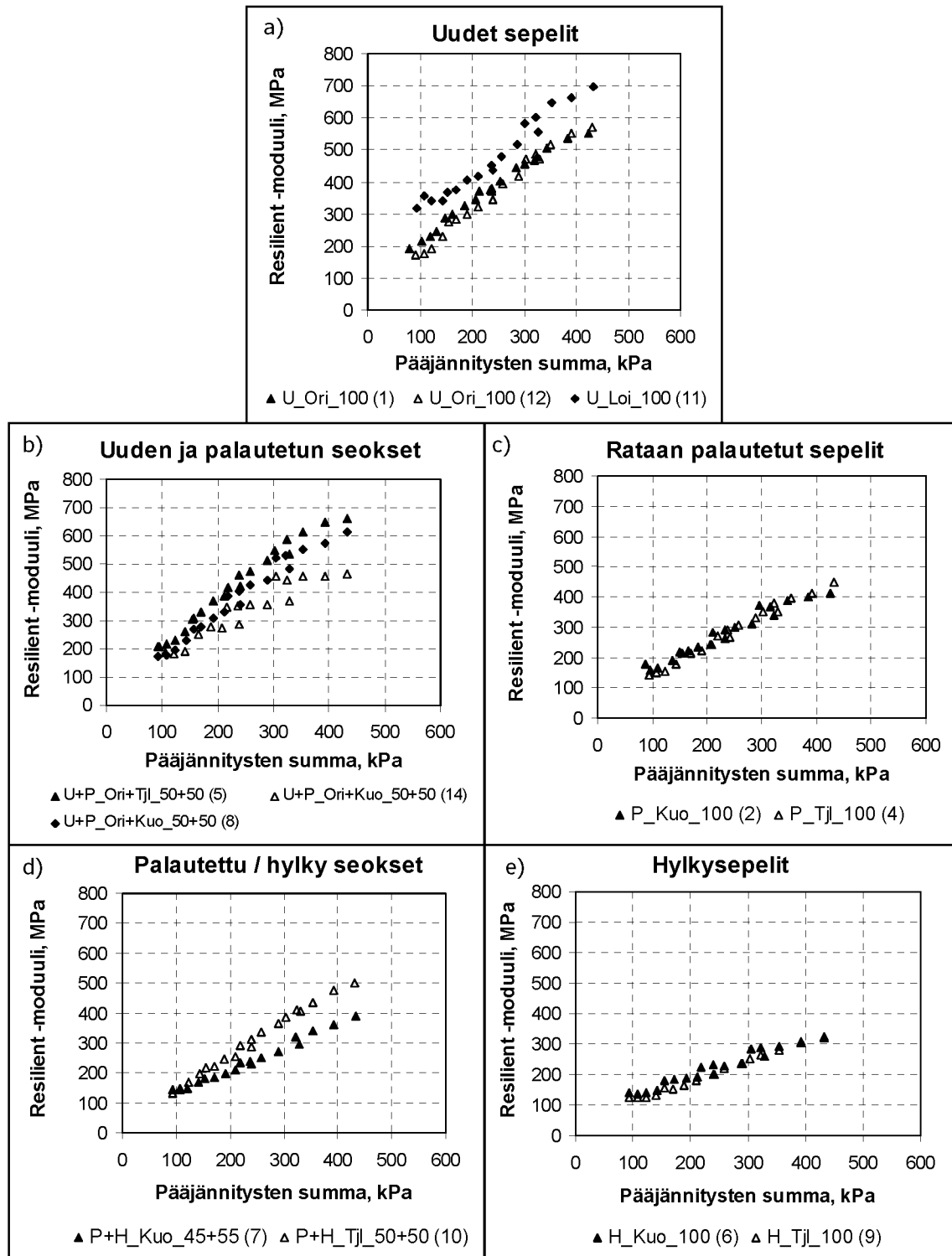
Kuvasta 4.7 nähdään, että uuden ja vanhan sepelin resilient-moduulit ovat hyvin lähellä toisiaan, joskin molemmissa tapauksissa uudella sepelillä on hieman suurempi jäykkyys erityisesti suuremmilla jännitystasoilla (akselikuormilla). Koska vertailtavat kiviainekset ovat eri alkuperää, tulosten vertailussa on huomattava, että muodonmuutuskäyttäytymisen erot eivät ole samasta rakeisuudesta huolimatta välttämättä kokonaan rakeiden kuluneisuudesta johtuvia. Raemuodon vaikutusta voitaisiin jatkossa tarkastella vaihtoehtoisesti samaa alkuperää olevista materiaaleista, joita on kulutettu keinotekoisesti esimerkiksi Los-Angeles-myllyssä. Tällöin on kuitenkin kiinnitettävä huomiota siihen, että rakeiden kuluneisuus vastaa kenttäolosuhteissa aiheutuvaa kuluneisuutta.



Kuva 4.7. Uuden sepelin ja Kuo-Slj rataosan materiaalin resilient-moduulien vertailua. Vasemmassa kuvassa molempien materiaalien rakeisuus on rataa palautetun sepelin rakeisuuden mukainen ja oikeanpuoleisessa kuvassa rakeisuuslukua 40 vastaava.

4.5.5 Lähdekiviaineksen vaikutus resilient-moduuliin

Materiaaliryhmien sisäiset resilient-moduulien erot havainnollistuvat kuvassa 4.8. Uusien sepelien osalta (kuva 4.8a) Loimaan sepelin resilient-moduuli oli keskimäärin noin 30 % (taulukko 4.8) suurempi kuin Oriveden sepelin. Sekä uuden sepelin että hylkysepin kanssa seoksena Tjl-Tku rataosan materiaalilla oli keskimäärin runsaat 20 % (taulukko 4.8) suurempi resilient-moduuli kuin Kuo-Slj rataosan materiaalilla vastaavilla seoksissa (kuva 4.8b ja 4.9d). Toisaalta pelkästään rataa palautetuilla sepeleillä tehdyissä kokeissa resilient-moduulissa ei havaittu eroa Tjl-Tku ja Kuo-Slj rataosien materiaalien välillä (kuva 4.8c). Myös molemmat hylkysepelit olivat resilient-moduuliensa suhteen yhteneviä (kuva 4.8e).



Kuva 4.8. Resilient-moduulien vertailu a) uusilla sepeleillä, b) uuden ja rataa palautetun sepeleiden seoksilla, c) rataa palautetuilla sepeleillä, d) palautetun ja hylkysepeleiden seoksilla ja e) hylkysepeleillä.

4.5.6 Resilient-moduulit pitkissä koesarjoissa

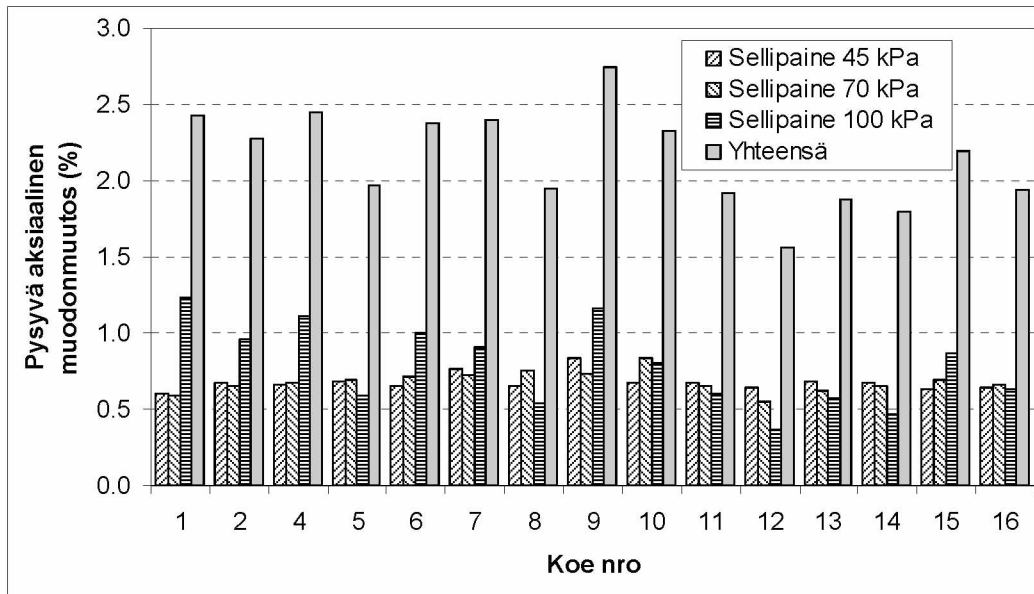
Lähinnä pysyvien muodonmuutosten tarkastelua varten tehdyissä pitkissä kuormitus-sarjoissa mitattuja keskimääräisiä resilient-moduuleja on verrattu koekohtaisesti varsinaisessa moduulimäärittäyksessä saatuihin arvoihin liitteessä B. Pääjännitysten summa on pitkissä sarjoissa pääasiallisesti moduulisarjoja suurempi, mutta moduulisarjojen havaintopisteiden trendin ekstrapolointi johtaa yleensä kohtuullisella tarkkuudella pitkissä sarjojen havaittuihin resilient-moduuleihin. Kuitenkin kokeissa 8 ja 5 pitkissä sarjoissa resilient-moduuli oli pienempi kuin moduulisarjasta ekstrapoloimalla saatava resilient-moduuliennuste. Lievempi, mutta samansuuntainen havainto voitiin tehdä lisäksi vain kokeesta 14. Kyseiset kolme koetta ovat kaikki uuden ja rataa palautetun sepelin seoksia, joille varsinaisessa moduulitarkastelussa saatu resilient-moduuli oli kokeen 5 osalta selvästi jopa pelkälle uudelle sepelille määritettyä moduulia suurempi. Havainto saattaa merkitä sitä, että palautetun ja uuden sepelin seoksen resilient-moduuli jää kuitenkin suuremmilla kuormitustasoilla (akselipainoilla) uutta sepeliä alhaisemmaksi. Epäselväksi jää se, voiko kokeessa 5 tehdyllä tavanomaista pidemmällä esikuormituksella olla vaikutusta havaittuun resilient-moduuliin.

Yksittäisten sarjojen sisällä tapahtuneet resilient-moduulien muutokset olivat yleensä vähäisiä. Kolisojan (1998) suhteistuneemmille kiviaineksille tekemissä miljoonan kuormitus syklin kokeissa resilient-moduulit yleensä alenivat, mutta vasta joidenkin satojen tuhansien kuormitus syklien jälkeen.

4.6 Tulokset: pysyvät muodonmuutokset

4.6.1 Pysyvien muodonmuutosten tarkasteluperiaate

Resilient-moduulin määrittäyksen jälkeen samoilla näytteillä tarkasteltiin pysyviä muodonmuutoksia taulukon 4.4 mukaisesti toteutetussa syklisessä kuormituksessa, jossa aksiaalisen kuormituspulssin suuruutta lisättiin vaiheittain. Kussakin vaiheessa kuormitusta toistettiin 10000 sykliä tai kunnes oli saavutettu noin 0,6 % pysyvä aksiaalinen muodonmuutos. Kuormitusta jatkettiin vastaavalla tavalla kahdella muulla sellipaineella. Toteutuneet sellipaineittain yhteenlasketut muodonmuutokset olivat kahden alimman sellipaineen osalta sarjojen välillä varsin tasaiset (kuva 4.9), jolloin ero kokonaismuodonmuutoksessa ei selitä mahdollisia käyttäytymiseroja. Kuvasta 4.9 nähdään, että viimeisenä toteutetulla suurimmalla sellipaineella kuormitusta jatkettiin joissakin kokeissa yli prosentin muodonmuutoksiin asti.

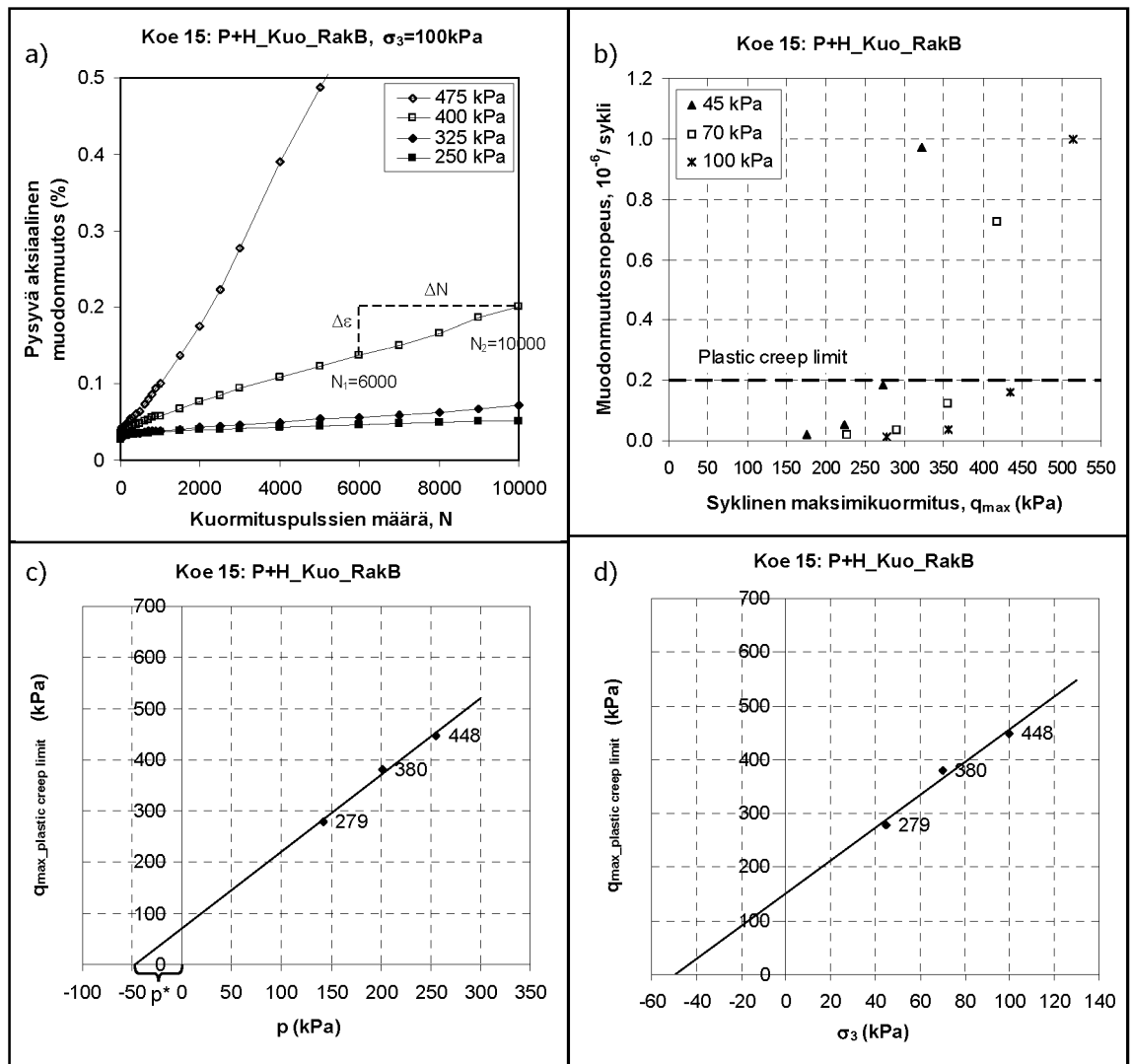


Kuva 4.9. Pysyvät aksiaaliset muodonmuutokset pitkissä sarjoissa erikseen kullakin sellipaineella ja yhteensä.

Kokeiden tuloksena eri deviatorisilla jännityksillä mitattujen pysyvien aksiaalisten muodonmuutosten kehittyminen syklimäärän suhteen on esitetty kullakin kolmella sellipaineella liitteessä C. Materiaalien välisen vertailun mahdollistamiseksi liitteessä C esitetyjä tuloksia käsiteltiin kuvan 4.10 mukaisella tavalla.

Ensimmäisessä vaiheessa kullekin kuormitussarjalle laskettiin aksiaalisen muodonmuutoksen nopeus sarjan lopussa välillä 6000...10000 sykliä (kuva 4.10a). Mikäli sarjaa ei kuormitettu loppuun (10000 sykliä) asti, muodonmuutosnopeus laskettiin sarjan lopusta. Muodonmuutosnopeuden tarkastelu ja sen mahdollistama tulosten ekstrapolointi on keskeistä syklimääriltään suhteellisen lyhyissä kuormitussarjoissa, sillä tukikerrosmateriaalin kohtaamat kuormitussyklimäärät ovat kertaluokkia suurempia. Huolimatta siitä, että myös kuormituksen alkusykleillä tapahtuvat muodonmuutokset ovat todellisessa rakenteessa merkityksellisiä, niiden poistaminen materiaalien vertailuparametrissa on perusteltua, koska mm. Kolisojan (1998) mukaan näytteen tiivistystavalla on suuri vaikutus kuormituksen alussa syntyviin muodonmuutoksiin.

Seuraavaksi muodonmuutosnopeudet esitettiin deviatorisen jännityksen maksimin (q_{max}) suhteen. Tässä vaiheessa kuvaajasta interpoloitiin kullekin sellipaineelle se q_{max} , joka vastasi muodonmuutosnopeutta $0,2 \cdot 10^{-6}$ /sykli (kuva 4.10b). Tämä muodonmuutosnopeus vastaa 2 % aksiaalista muodonmuutosta 10000 kuormitussyklin, eli esimerkiksi 200 kN:n akselipainolla 2 miljoonan bruttotonnin, vaikutuksesta. Kyseinen raja on standardissa SFS-EN 13286-7 määritelty 'plastic creep limitiksi'. Standardin informatiivisessa liitteessä C muodonmuutosnopeus lasketaan välille 3000...5000 sykliä. Samalle syklivälille laskettuna muodonmuutosnopeus $0,0225 \cdot 10^{-6}$ /sykli määritellään standardissa stabiloituvaa käyttäytymistä indikoivaksi 'plastic shakedown limitiksi'. Periaatteensa suhteen sen käyttö vertailurajana olisi ollut perustellumpaa, mutta mittaustulosten valossa ei mielekäästä, koska useimmissa kokeissa raja ylittyi jo viimeistään toisella deviatorisella jännitystasolla.



Kuva 4.10. Pysyvien muodonmuutosten tarkasteluperiaate: a) muodonmuutosnopeuden $\Delta\epsilon/\Delta N$ laskenta väliltä 6000–10000 sykliä, b) eri suuruisilla syklisillä kuormituksilla havaitut muodonmuutosnopeudet kussakin sellipaineessa (45 kPa, 70 kPa, 100 kPa) sekä muodonmuutosnopeutta $0,2 \cdot 10^{-6}/\text{sykli}$ vastaavan kuormitustason, 'plastic creep limitin' interpolointi, c) b-kuvasta eri sellipaineilla määritetyt 'plastic creep limitit' pääjännitysten keskiarvon (p) suhteen, d) vaihtoehtoinen tarkastelutapa, jossa 'plastic creep limitiä' vastaavat kuormitustasot esitetään sellipaineen suhteen.

Kolmannessa vaiheessa kullakin sellipaineella määritettyjä, 'plastic creep limitiä' vastaavia deviatorisen jännityksen arvoja tarkasteltiin pääjännitysten keskiarvon (p) suhteen (kuva 4.10c). Näin kuvatut havaintopisteet asettuivat varsin tarkasti samalle suoralle. Samanlaista lähestymistapaa on käytetty kirjallisuudessa murtorajan tarkasteluun useilla eri sellipaineilla tehtyjen staattisten kokeiden tulokinnassa. Kuvasta 4.10c havaitaan, että 'plastic creep limit'-suora leikkaa vaaka-akselin negatiivisella p :n arvolla ($-p^*$) ilmentäen materiaalin näennäistä koheesiota. Kolisoja (1998) teki vastaavan havainnon moniportaisten staattisten kokeiden tuloksena. Ilmeinen syy näennäiseen koheesioon karkearakeisessa raidesepeleissä on tiivistä pakkautuneiden rakeiden välinen lukkiutuminen. Tarkastelluissa materiaaleissa p^* :n arvot vaihtelivat välillä 17–52 (taulukko 4.9).

Eri materiaalien 'plastic creep limitiä' vastaavien deviatoristen jännitysten vertailu on mahdollista joko kuvan 4.10c mukaisesti jännityssuhteen perusteella tai kuvan 4.10d mukaisesti suoraan kutakin sellipainetta vastaavan kuormituspulssin raja-arvon perusteella. Kun pyritään arvioimaan koetulosten käytännön merkitystä, tulee ottaa huomioon, että todellisessa tilanteessa vaakasuuntaiset jännitykset kasvavat materiaalin sisäisen kitkan vaikutuksesta deviatorisen kuormituksen (akselikuorman) mukaan, mikä ei ole vakiosellipainekokeessa mahdollista. Tästä syystä todellisen tilanteen muodonmuutuskäyttäytymistä arvioitaessa jännitystilaa on yleensä perusteltua tarkastella pääjännitysten keskiarvon suhteen, kuten kuvassa 4.10c. Kuvan 4.10d mukainen tarkastelu on kuitenkin soveltuvampi tukikerroksen sivuttaistuen merkityksen arviointiin sekä materiaalien välisten erojen tarkasteluun.

4.6.2 Jännitystilän vaikutus pysyviin muodonmuutoksiin

Kuvan 4.10c mukaisessa tarkastelussa keskimääräiseen pääjännitykseen sidotut 'plastic creep limitiä' vastaavat jännityssuhteet (η^*) on laskettu taulukkoon 4.9. Jännityssuhde vastaa kuvan 4.10c suoran kulmakerrointa. Tarkastelluissa materiaaleissa 'plastic creep limitiä' vastaava jännityssuhde vaihteli välillä 1,484–1,842 keskimääräisen arvon ollessa 1,642.

Taulukko 4.9. 'Plastic creep limitiä' vastaavat jännityssuhteet (η^) näennäisen koheesion vaikutus (p^*) huomioiden. Lisäksi laskettuna $\eta^*:n$ ja $p^*:n$ perusteella 'plastic creep limitiä' vastaava deviatorisen jännityksen maksimiarvo kolmella keskimääräisellä pääjännityksellä (p) (vrt. kuva 4.10c).*

	p^* (kPa)	$\eta^* = \frac{q_{\max_limit}}{(p + p^*)}$	q_{\max_limit} (kPa)		
			$p=150\text{kPa}$	$p=200\text{kPa}$	$p=250\text{kPa}$
Koe 1 U_Ori_100	17	1,733	290	377	463
Koe 2 P_Kuo_100	24	1,705	297	383	468
Koe 4 P_TjL_100	36	1,614	300	381	461
Koe 5 U+P_Ori+TjL_50+50	19	1,842	311	403	496
Koe 6 H_Kuo_100	17	1,653	276	359	442
Koe 7 P+H_Kuo_45+55	42	1,515	290	366	442
Koe 8 U+P_Ori+Kuo_50+50	24	1,690	294	378	463
Koe 9 H_TjL_100	19	1,729	293	379	465
Koe 10 P+H_TjL_50+50	27	1,699	301	386	471
Koe 11 U_Loi_100	52	1,562	316	394	473
Koe 12 U_Ori_100	27	1,676	297	381	465
Koe 13 U_Ori_RakA	48	1,597	316	396	476
Koe 14 U+P_Ori+Kuo_50+50	31	1,638	296	378	460
Koe 15 P+H_Kuo_RakB	47	1,497	295	370	445
Koe 16 U_Mix_RakB	47	1,484	292	366	440
Keskiarvo	32	1,642	298	380	462

Koska kuvan 4.10c suora ei näennäisen koheesion vaikutuksesta (p^* kuvassa 4.10c) johtuen leikkaa vaaka-akselia nolla-arvolla, materiaaleja ei voida etenkin alhaisilla jännitystasoilla kuvata pelkästään jännityssuhteen perusteella. Tästä syystä taulukkoon 4.9 on laskettu jännityssuhteiden perusteella p^* huomioiden myös deviatorisen jännityksen maksimiarvo kolmella keskimääräisellä pääjännityksen (p) arvolla. Materiaalien välistä vertailua ei kuitenkaan ole mielekäästä tehdä suoraan

taulukon 4.9 lukuarvoilla, koska deviatorisen maksimijännityksen lisäys kasvattaa kyseisessä tarkastelussa pääjännitysten keskimääräistä arvoa vain yhdellä kolmanneksella jännityslisäyksestä ja materiaalien väliset erot ilmenevät näin ollen todellista pienempinä (vrt. luku 4.6.3, kuva 4.11).

Soveltuvin tapa materiaalien väliseen vertailuun on tarkastella kullakin sellipaineella määritettyjä 'plastic creep limitiä' vastaavia deviatorisen maksimijännityksen arvoja. Nämä kuvan 4.10d mukaisen tarkastelun havaintopisteitä ilmentävät arvot on esitetty taulukossa 4.10. Materiaalien välinen vertailu on mahdollista tehdä suoraan taulukon 4.10 'plastic creep limit'-lukuarvoista sellipaineittain.

Taulukko 4.10. Kullakin sellipaineella (σ_3) määritetty 'plastic creep limitiä' vastaava deviatorisen jännityksen maksimi (q_{\max_limit}).

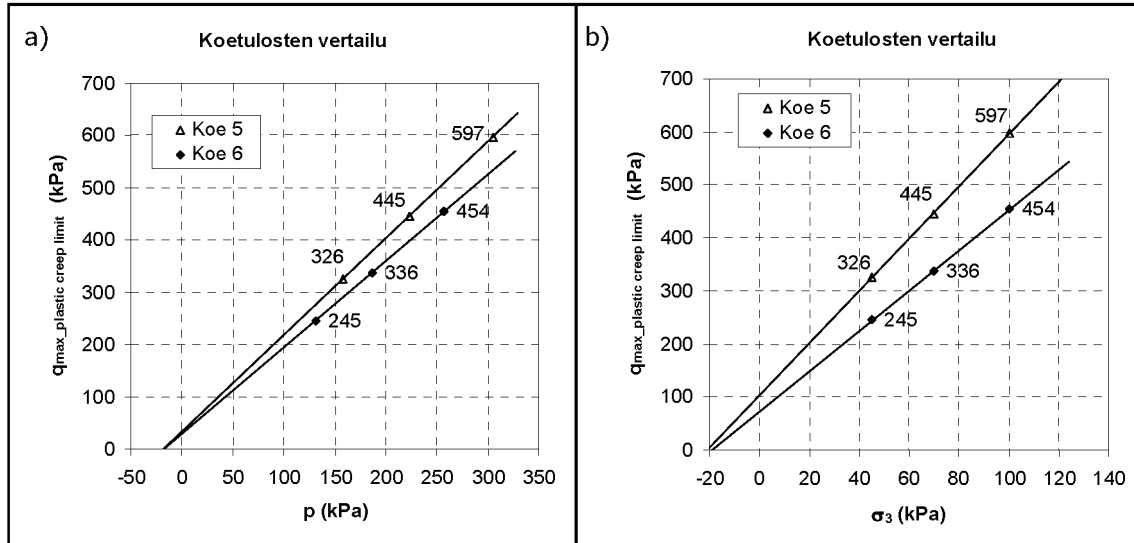
		q_{\max_limit} (kPa)		
		$\sigma_3=45\text{kPa}$	$\sigma_3=70\text{kPa}$	$\sigma_3=100\text{kPa}$
Koe 1	U_Ori_100	272	378	
Koe 2	P_Kuo_100	282	408	506
Koe 4	P_TjL_100	302	377	499
Koe 5	U+P_Ori+TjL_50+50	326	445	597
Koe 6	H_Kuo_100	245	336	454
Koe 7	P+H_Kuo_45+55	273	366	447
Koe 8	U+P_Ori+Kuo_50+50	282	382	
Koe 9	H_TjL_100	282	377	513
Koe 10	P+H_TjL_50+50	297	404	520
Koe 11	U_Loi_100	322	434	506
Koe 12	U_Ori_100	288	390	504
Koe 13	U_Ori_RakA	331	419	525
Koe 14	U+P_Ori+Kuo_50+50	281	392	486
Koe 15	P+H_Kuo_RakB	279	380	448
Koe 16	U_Mix_RakB	277	366	444
Keskiarvo		289	390	496

'Plastic creep limitiä' vastaava deviatorisen jännityksen maksimiarvo kaikkien materiaalien keskiarvona oli 45 kPa sellipaineella 289 kPa, 70 kPa sellipaineella 390 kPa ja 100 kPa sellipaineella 496 kPa. Tämän trendin mukaisena vaihteluvälin 30–150 kPa sisällä tapahtuva 20 % lisäys sellipaineessa mahdollistaa keskimäärin 10–16 % lisäyksen kuormituspulssiin, jotta pysyvät muodonmuutokset säilyvät samalla tasolla. Laskelmaa voidaan soveltaa arvioitaessa tukikerroksen vaakajännitystilän lisäämisestä (ks. luku 4.7.2 & kuva 4.15, Lackenby et al. 2007) saatavia hyötyjä akseli-kuorman kasvattamiseksi tai muodonmuutosten pienentämiseksi.

4.6.3 Havainnot materiaalitekijöiden vaikutuksesta pysyviin muodonmuutoksiin

Pysyvien muodonmuutosten osalta erot materiaalien välillä olivat huomattavasti pienempiä ja vaikeammin selitettäviä kuin resilient-moduuleille havaitut erot. Pysyvän muodonmuutuskäyttäytymisen suhteen tarkastelluista materiaaleista heikoin oli kokeen 6 Kuo-Slj rataosan hylkysepele ja etenkin suurimmilla sellipaineilla selvästi kestävin oli kokeen 5 seosmateriaali TjL-Tku radalla rataa palautetusta ja Oriveden uudesta sepelistä. Näiden käyttäytymiseltään äärilaitoja edustavien materiaalien eroa on tarkasteltu kuvassa 4.11. Taulukossa 4.11 materiaalien 'plastic

creep limitiä' vastaavia deviatorisia jännityksiä eri sellipaineilla on verrattu suhteessa heikoimpaan. Vertailun tuloksena parhaan materiaalin (koe 5) q_{\max_limit} oli keskimäärin 32 % suurempi kuin heikoimman (koe 6).



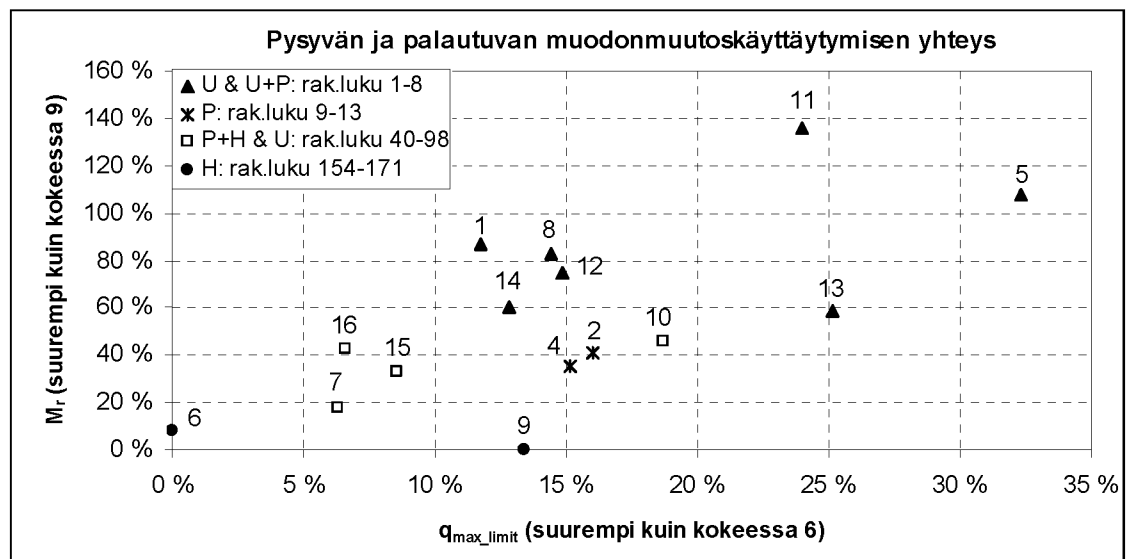
Kuva 4.11. Koetulosten vertailuperiaate a) pääjännitysten keskiarvon ja b) sellipaineen suhteen. Kuvan koe 5 (U+P_Ori+TjL_50+50) vastusti pysyviä muodonmuutoksia tarkastelluista materiaaleista parhaiten ja koe 6 (H_Kuo_100) oli vastaavasti kaikkein heikoin.

Taulukko 4.11. 'Plastic creep limitiä' vastaavan deviatorisen jännityksen maksimin (q_{\max_limit}) vertailu suhteessa heikoimpaan, kokeen 6 materiaaliin eri sellipaineilla ja kyseisillä sellipaineilla keskimäärin. Materiaalit on listattu keskiarvon mukaisessa järjestyksessä parhaasta heikoimpaan.

		Osuus, jonka materiaalin q_{\max_limit} on suurempi kuin kokeessa 6			
		$\sigma_3=45\text{kPa}$ a	$\sigma_3=70\text{kPa}$	$\sigma_3=100\text{kPa}$	Keskiarvo
Koe 5	U+P_Ori+TjL_50+50	33 %	32 %	31 %	32 %
Koe 13	U_Ori_RakA	35 %	25 %	16 %	25 %
Koe 11	U_Loi_100	31 %	29 %	11 %	24 %
Koe 10	P+H_TjL_50+50	21 %	20 %	15 %	19 %
Koe 2	P_Kuo_100	15 %	21 %	11 %	16 %
Koe 4	P_TjL_100	23 %	12 %	10 %	15 %
Koe 12	U_Ori_100	18 %	16 %	11 %	15 %
Koe 8	U+P_Ori+Kuo_50+50	15 %	14 %		14 %
Koe 9	H_TjL_100	15 %	12 %	13 %	13 %
Koe 14	U+P_Ori+Kuo_50+50	15 %	17 %	7 %	13 %
Koe 1	U_Ori_100	11 %	13 %		12 %
Koe 15	P+H_Kuo_RakB	14 %	13 %	-1 %	9 %
Koe 16	U_Mix_RakB	13 %	9 %	-2 %	7 %
Koe 7	P+H_Kuo_45+55	11 %	9 %	-2 %	6 %
Koe 6	H_Kuo_100				

Kuvia 4.11a ja 4.11b vertaamalla havaitaan hyvin, kuinka tietyllä keskimääräisen pääjännityksen arvolla erot ilmenevät kuvassa 4.11a todellista pienempinä (suorat lähempänä toisiaan). Tämä johtuu siitä, että suuremman deviatorisen jännityksen aiheuttama lisä keskimääräiseen pääjännitykseen tulee huomioiduksi suuruudeltaan vain yhdellä kolmanneksella jännityslisäyksestä, jos tilannetta tarkastellaan tietyllä keskimääräisellä pääjännityksellä.

Yhdistämällä taulukkojen 4.11 ja 4.7 aineistot voidaan hahmotella palautuvan ja pysyvän muodonmuutuskäyttäytymisen välistä yhteyttä kuvan 4.12 mukaisesti. Kuvasta havaitaan, että sekä kokeiden 5 ja 11 materiaalit vastustivat tehokkaimmin sekä pysyviä että palautuvia muodonmuutoksia. Kuvasta nähdään, että uudet sekä uuden ja rataa palautetun karkean sepelin seokset (U & U+P) omasivat systemaattisesti tarkasteluaineiston suurimmat resilient-moduulit, mutta pysyvien muodonmuutosten vastustuskyvyltään tilanne ei ollut aivan yhtä selvä. Osassa U & U+P materiaaleista q_{\max_limit} jäi lievästi alhaisemmaksi kuin rataa palautetuissa materiaaleissa (P). Vastaavasti hylkysepeleä sisältäneet materiaalit (H & P+H) olivat altteimpia sekä palautuville että pysyville muodonmuutoksille.



Kuva 4.12. Pysyvän ja palautuvan muodonmuutuskäyttäytymisen yhteys. Pystyakselilla taulukon 4.7 mukainen resilient-moduulin (M_r) suhteellinen poikkeama heikoimmasta kokeesta 9. Vaaka-akselilla 'plastic creep limitiä' vastaavan deviatorisen jännityksen maksimin (q_{\max_limit}) suhteellinen poikkeama heikoimmasta kokeesta 6. Havaintopisteen yläpuolella kokeen numero.

Materiaalien pysyvän muodonmuutuskäyttäytymisen erojen vähäisyydestä johtuen eri vertailuryhmissä tehtyä tarkastelua ei esitetä samalla tarkkuudella kuin resilient-moduulille, vaan materiaalien vertailua koskevat havainnot listataan seuraavassa.

Toistettavuus:

- Testattujen rinnakkaisnäytteiden perusteella pysyvien muodonmuutosten kehittymisnopeuden määrittämistä ajatellen kokeiden toistettavuus oli erittäin hyvä. Tämä havainnollistuu esimerkiksi kuvasta 4.12, jossa kokeiden 8 ja 14 välillä sekä toisaalta kokeiden 1 ja 12 välillä q_{\max_limit} arvojen (vaaka-akseli) ero on hyvin pieni.

- Materiaaliin nähden ennakko-odotuksia paremmin ja jopa poikkeuksellisen hyvin sekä pysyviä että palautuvia muodonmuutoksia vastustaneen kokeen 5 tulos herätti epäilyksen esikuormituksen merkityksestä. Esikuormitus oli juuri tässä kokeessa syklimäärältään noin kolminkertainen muihin kokeisiin verrattuna (vrt. taulukko 4.2), mutta sillä ei kuviteltu olevan vaikutusta käyttäytymiseen varsinaisissa kuormitussarjoissa, koska muidenkin kokeiden esikuormituksessa muodonmuutosnopeus oli hidastunut esikuormituksen pysäytyskriteerin (ks. luku 4.3) alle.

Rakeisuus:

- *Oriveden uudella sepelillä* parhaan tuloksen antoi materiaali, jonka rakeisuus vastasi rataan palautetun sepelin rakeisuutta (koe 13, kuva 4.1). Tällä saatu q_{\max_limit} oli keskimäärin 10 % parempi kuin suuremman maksimiraekoon omaavalla sepelin luonnollisella rakeisuudella (kokeet 1 ja 12), joka mukailee rakeisuusvaatimusten hienorakeisempaa rajakäyrää (kuva 4.1). Havainto viittaisi siihen, että uuden sepelin optimaalinen maksimiraekoko saattaisi olla hieman nykyistä pienempi, mutta ero pieneni sellipaineen kasvaessa. Hienorakeista ainesta sisältäneellä, rakeisuuslukua 40 vastanneella rakeisuudella (koe 16, kuva 4.1) alttius pysyville muodonmuutoksille oli testatuista Oriveden uuden sepelin rakeisuuksista suurin. Sillä saatuun tulokseen nähden rataan palautetun sepelin rakeisuudella q_{\max_limit} oli keskimäärin 17 % suurempi. Erot havainnollistuvat kokeiden nro 1, 12, 13 ja 16 vertailusta kuvassa 4.12.
- *Kuo-Slj rataosan materiaalien* vertailuryhmässä q_{\max_limit} kasvoi rakeisuuden karkeistuessa järjestyksessä H, H+P_50+50, H+P_RakB, P (kokeet 6, 7, 15 ja 2 kuvassa 4.12), siten että rataan palautetun sepelin q_{\max_limit} oli keskimäärin 16 % suurempi kuin hylkysepelin. Toisaalta rataan palautetun ja uuden sepelin seoksilla (kokeet 8 ja 14) sekä pelkällä Oriveden uudella sepelillä q_{\max_limit} ei ollut suurempi kuin rataan palautetulla sepelillä.
- *Tjl-Tku rataosan materiaalien* vertailussa rakeisuuden merkitys vaikuttaa ristiriitaiselta ja vastaavuus Kuo-Slj rataosan materiaaleille tehtyihin havaintoihin on heikko. Hylkysepelin (koe 9) q_{\max_limit} oli kylläkin alhaisin, mutta lähes sama kuin rataan palautetulla sepelillä (koe 4). Lisäksi näiden seoksen (koe 10) q_{\max_limit} oli molempia parempi. Uuden Oriveden sepelin ja Tjl-Tku rataosan hylkysepelin q_{\max_limit} oli yhtenevä. Uuden ja rataan palautetun sepelin seoksella (koe 5) oli selvästi suurin q_{\max_limit} , noin 10–15 % kaikkia muita vertailuryhmän materiaaleja suurempi.
- Hienontuneimpien materiaalien poikkeuksellisen korkeita q_{\max_limit} -arvoja tarkasteltaessa on syytä huomata, että kokeissa käytetty vesipitoisuus saattoi mahdollistaa materiaalia lujittavan näennäisen koheesion muodostumisen, mutta vedellä kyllästyneessä tilassa murtolujuus saattaisi näissä materiaaleissa olla dramaattisesti heikompi.

Rakeiden kuluneisuus:

- *Rataan palautetun sepelin rakeisuudella* (kokeet 13 ja 2) rakeiden kuluneisuuden merkitys näkyi hieman alhaisempana kuormituksen kestonä, mikä tosin oli havaittavissa lähinnä vain alhaisimmalla sellipaineella. *Rakeisuuslukua 40 vastaavalla rakeisuudella* (kokeet 15 ja 16) kuluneella ja uudella sepelillä q_{\max_limit} oli yhtenevä.

Kiviaines:

- *Uusista sepeleistä* Loimaan kiviaineksella (koe 11) $q_{\max, \text{limit}}$ oli keskimäärin 9 % suurempi kuin Oriveden sepelissä (kokeet 1 ja 12), mutta eroa ei ollut suurimmalla sellipaineella. *Hylkysepin* (kokeet 9 ja 6) samoin kuin *hylkysepin ja rataa palautetun sepin seoksessa* (kokeet 10 ja 7) TjL-Tku rataosan materiaalilla oli 13 % suurempi kuormituksen kesto kuin Kuo-Slj rataosan materiaalilla. *Rataan palautetun ja uuden sepin seoksilla* (kokeet 5 sekä 8 ja 14) vastaava ero oli 18 % TjL-Tku rataosan materiaalin eduksi. *Pelkällä rataa palautetulla sepeillä* (kokeet 2 ja 4) ei havaittu eroa.

4.7 Raidesepelin kolmiaksiaalikoetarkasteluja kirjallisuudessa

4.7.1 Periaatteellisia tarkasteluja

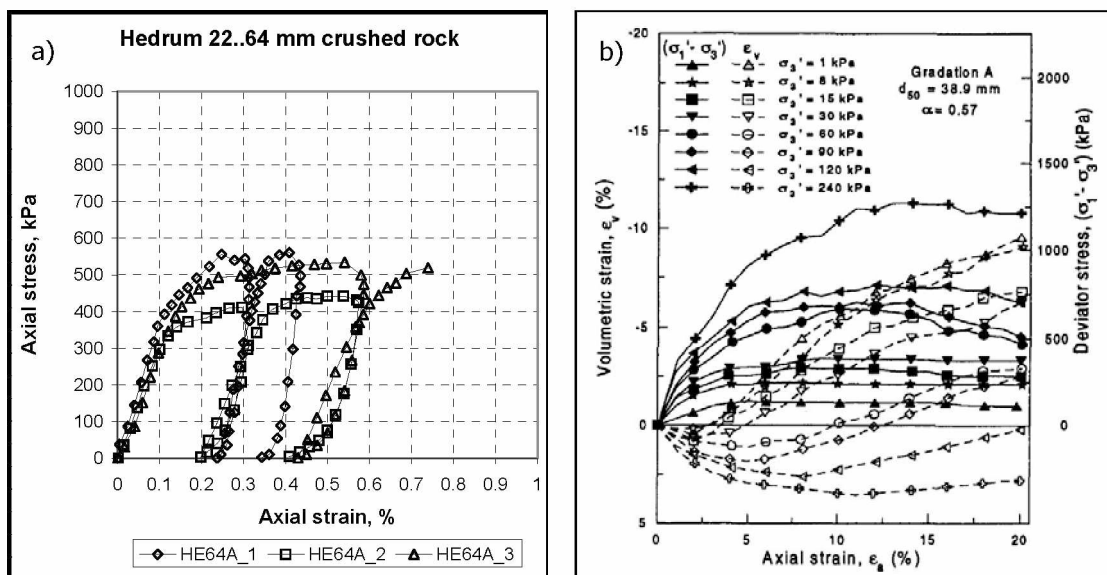
Työn yhteydessä pyrittiin sepin kuormanvälityskyvyn kokeellisten tarkastelujen tueksi selvittämään suppealla kirjallisuuskatsauksella raidesepelikokoluokan kiviaineksille tehtyjen kolmiaksiaalikokeiden havaintoja koskien ensisijassa jännitys-muodonmuutos-käyttäytymistä.

Maamateriaalien lujuusominaisuuksien tarkastelussa hyvin tavallisesti käytettyä kolmiaksiaalikoetta on sovellettu myös raidesepelitutkimuksessa jo vuosikymmeniä. Kanadassa vaikuttanut Gerald P. Raymond (Queen's University, Ontario) oli mukana julkaisemassa 1970-luvun lopulla useita raidesepelin kolmiaksiaalikokeisiin perustuneita tutkimuksia. Tarkastelut koskivat halkaisijaltaan 225 mm ja korkeudeltaan 450 mm näytteille tehtyjä staattisia (Raymond & Davies 1978) ja syklisiä (Raymond & Williams 1978) koesarjoja. Tutkimusten keskeinen tavoite oli arvioida kolmiaksiaalikokeissa eri jännitystiloissa havaitun muodonmuutos- ja hienonemiskäyttäytymisen perusteella raidesepelin sopivaa maksimiraekokoa ja raekokojakautumaa. Samoin kuin useissa muissa julkaisuissa, myös Raymondin tutkimat materiaalit olivat kuitenkin selvästi Ratahallintokeskuksen nykyvaatimuksia tai sepinpuhdistuksessa rataa palautettavaa sepeä hienorakeisempia.

Kolmiaksiaalikokeen avulla on pyritty arvioimaan myös raidesepelin hienonemista (Roelfeldt 1980; Jeffs 1989; Raymond & Dyaljee 1979; Raymond ja Bathurst 1994). Hienonemistarkastelussa kuitenkin korostuu kolmiaksiaalikokeen huomattava puute, pääjännityssuuntien muuttumattomuus, mikä ei simuloi liikkuvaa pyöräkuormaa (Nurmikolu 2006). Tämä on todennäköisesti keskeinen syy siihen, että pitkissäkin syklissä kokeissa hienoneminen on jäänyt kertaluokkaa vähäisemmäksi kuin kenttäolosuhteissa. Tuoreimmat kiviaineksen hienonemiseen liittyvät kolmiaksiaalikoetarkastelut koskevat lähinnä hienonemisen teoreettista mallintamista. Indraratna ja Salim (2002) loivat analyyttisen mallin staattisessa kuormituksessa tapahtuvalle hienonemiselle. Salim (2004) laajensi mallia myös sykliseen kuormitukseen. Indraratna et al. (2005) totesivat raidesepelin hienonemisen syklisessä kolmiaksiaalikokeessa olevan alhaisimmillaan 35–70 kPa sellipaineella, jonka he arvioivat suuremmaksi kuin tukikerroksessa raidetta vastaan kohtisuorassa suunnassa vaikuttava vaakajännitystaso. Lackenby et al. (2007) tarkensivat Indraratna et al. (2005) havaintoa toteamalla hienonemisen riippuvan jännityssuhteesta, jolloin optimaalinen sivupaine riippuu kuormitustasosta, eli junakuormasta.

Kirjallisuudesta havaittiin muutamia suurella näytekoolla tehtyihin kolmiakσιαalikokeisiin perustuvia jännitys-muodonmuutostarkasteluja, joissa tutkimusmateriaalien rakeisuus vastasi nykyvaatimusten mukaisen uuden tai rataan sepelin puhdistuksen yhteydessä palautettavan raideseperin rakeisuutta.

Tyypillisesti karkearakeisten materiaalien staattisissa kolmiakσιαalikokeissa murtoa vastaavan aksiaalisen muodonmuutoksen suuruusluokka on 0,1...0,4 % (Kolisoja 1994, 1996, 1998). Kolisojan aineistossa ei ole uuden raideseperin rakeisuuksia, mutta useita lähes rataan palautetun sepelin rakeisuuden omaavia materiaaleja kuitenkin on, eikä niiden osalta murtovenymä havaittavasti poikkea edellä mainitusta (kuva 4.13a). Skoglundin (2002) tuloksista voidaan havaita aksiaalisen muodonmuutoksen kasvavan dramaattisesti myös tutkituilla raideseperirakeisuuksilla jo suuruusluokaltaan 0,1–0,2 % aksiaalisella muodonmuutoksella. Myös Ishikawan (2005) tuloksissa myötö alkaa alle 0,5 % aksiaalisella muodonmuutostasolla, mutta jonkinasteinen myötölujittuminen jatkuu aina 5 % aksiaaliseseen muodonmuutokseen saakka.



Kuva 4.13. Aksiaalisen muodonmuutostason suuruusluokkaeroa havainnollistavat esimerkit jännitys-muodonmuutos-kuvaajista a) Kolisoja (1996) hieman raideseperillä hienorakeisemmalla rakeisuudella 50 kPa sellipaineessa tehdyistä kokeista (3 rinnakkaisnäytettä) ja b) Indraratna et al. (1998) raideseperille tekemistä staattisista kolmiakσιαalikokeista.

Raideseperin muodonmuutosominaisuuksia koskevassa kirjallisuudessa hyvin näkyvästi esiintyy useat Australiassa (University of Wollongong, New South Wales) tehdyt tarkastelut. Indraratna et al. (1998) totesivat staattisissa kolmiakσιαalikokeissa, että toisin kuin hienorakeisemmillä materiaaleilla, raideseperillä ei voida havaita selvää murtotasoa edes suurilla (noin 20 %) aksiaalisilla muodonmuutoksilla. Sepelikokoluokan materiaalissa murto on heidän mukaansa hitaasti etenevä 'pullahdus'. He kuvasivat murtoa deviatorisen jännityksen huippuarvolla, joka saavutettiin sellipaineesta riippuen vasta suuruusluokaltaan 5–14 % aksiaalisella muodonmuutoksella (kuva 4.13b).

Indraratna et al. (1998) havaintoja jossain määrin tukevat myös Raymond & Davies (1978) esittämät staattisen kolmiakσιαalikokeen jännitys-muodonmuutuskäyrät, joissa murtojännitys saavutetaan selvän myötölujittumisen jälkeen useiden prosent-

tien aksiaalisilla venymätasoilla, joskaan tarkastellun materiaalin rakeisuus ei ole vertailukelpoinen edellä mainittujen kanssa. Niin ikään Fair (2003) samoin kuin Key (1998) havaitsivat 235 mm näytehalkaisijalla raidesepelille tekemissään kokeissa vastaavaa lievää myötölujittumista useiden prosenttien muodonmuutoksiin saakka. Syklisen kuormituksen jälkeen tehtyjen staattisten kokeiden alussa vastaavat materiaalit olivat dramaattisesti jäykempiä ja deviatorisen jännityksen huippuarvo saavutettiin suuruusluokaltaan 0,2 % aksiaalisella muodonmuutoksella. Syklisen kuormituksen jälkeen jäykkyys oli hieman yllättäen suurempi myös niissä tapauksissa, joissa syklisessä kokeessa tapahtui lievää tilavuuden kasvua.

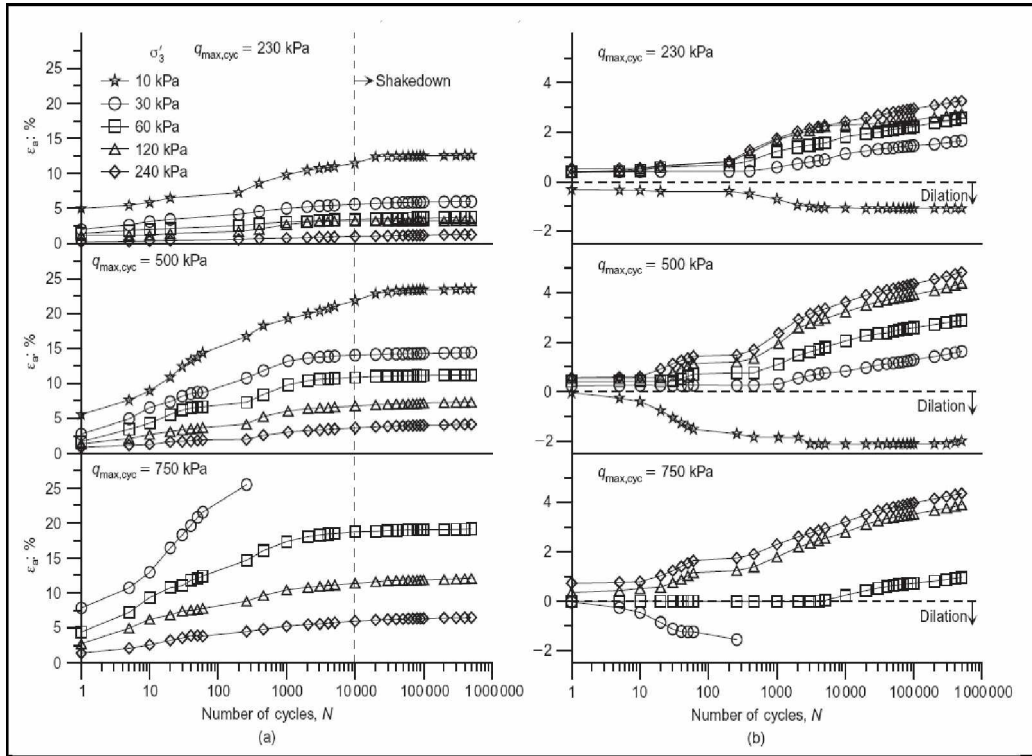
Fairin (2003) havaintojen nojalla kuvan 4.13 ristiriitaa selittävänä tekijänä saattaa olla se, että Indraratna et al. (1998) tutkimuksissa näytemateriaalin alkutiheys oli vain 1,53 t/m³ (huokoisuus 44–46 %), minkä tosin kerrottiin vastaavan kentällä tehtyjä tiiveyshavaintoja. Näytemateriaalin rakeisuus vastasi likimäärin tässä tutkimuksessa tarkastellun Kuo-Slj rataa palautetun sepelin rakeisuutta, jolla omissa kokeissa alkutiheydeksi (taulukko 4.2) saatiin 1,57 t/m³ uudella kiviaineksella (Orivesi, koe 13) ja 1,77 t/m³ rataa palautetulla kiviaineksella (Kuo-Slj, koe 2). Skoglundin kokeissa näytteen tiheys oli 1,74–1,78 t/m³ ja rakeisuus Indraratna et al. (1998) tutkimuksen materiaaliin nähden hieman karkearakeisempi ja yhtä tasarakeinen, joten ero rakeisuudessa ei selitä tiheyseroa. Sen sijaan Skoglundin materiaalin suuri kiintotiheys (3,02 t/m³) saattaa selittää sitä ainakin osittain. Ishikawan näytteessä alkutiheys oli 1,63 t/m³ ja rakeisuus vastasi likimäärin omien kokeiden Tjl-Tku rataa palautetun sepelin rakeisuutta, jolle alkutiheydeksi saatiin 1,70 t/m³. Näytteiden alkutiivistilan merkitys käyttäytymiseroon staattisessa kokeessa jää tarkastelun pohjalta hieman avoimeksi, mutta Indraratna et al. (1998) näytteiden muita alhaisempi tiivistila vaikuttaa todennäköiseltä.

Kokonaan toinen kysymys on se, millainen tiivistila olisi raidesepelin muodonmuutostarkasteluun mielekkäin. Asian tekee erityisen monimutkaiseksi raidesepelin tukeminen ja sen aiheuttama löyhtyminen. Tästä syystä tarvittaisiin lisäselvitystä tukikerroksen todellisesta tiivistilasta kunnossapitosykliden ja liikennekuormituksen eri vaiheissa ja erilaisilla raidesepelin rakeisuuksilla.

Kolisojan (1998) mukaan on selvää, että syklisen kuormituksen alkusykleillä syntyvät muodonmuutokset ovat suuresti näytteen alkutiivistydestä ja tiivistystavasta riippuvaisia. Syklisessä kuormituksessa löyhän ja tiiviin materiaalin muodonmuutosten ero on vielä suurempi kuin ero vastaavien materiaalien murtolujuudessa staattisessa kokeessa.

University of Wollongongin tutkimusryhmä jatkoi tarkastelua hyvin suurilla (akσιαalinen muodonmuutos jopa 20 %) muodonmuutostasoilla myös yhteensä 24 pitkässä (500000 sykliä) syklisessä kolmiakσιαalikokeessa (Lackenby et al. 2007). Kokeissa tarkasteltiin erityisesti sellipaineen ja kuormituspulssin suuruuden merkitystä varioiden sellipainetta välillä 1–240 kPa ja aksiaalista kuormituspulssia välillä 230–1250 kPa. Lisäksi kaksi koetta tehtiin kuormituspulssia portaittaisesti lisäten. Näytemateriaali oli sama kuin edellä Indraratna et al (1998) kuvailtu ja näytteet valmisteltiin noin 1,56 t/m³ tiheyteen. Alhaiseen alkutiiveyteen viittaisi se, että resilient-moduuli likimäärin kaksinkertaistui 100 kuormitussyklin jälkeisistä arvoista 500000 kuormitussykliin tullessa. Lackenby et al. (2007) mielenkiintoisen tuloksen mukaan hyvinkin suurilla kuormilla (ja pienillä sellipaineilla) raidesepelissä tullaan saavuttamaan, joskin suuren muodonmuutoksen jälkeen, lopulta stabiloitua shakedown-tila, jos aksiaalinen muodonmuutos säilyy alun muutama tuhat sykliä alle

25 % tasolla. Kuvasta 4.14 nähdään, että ensimmäisten kuormitus syklien osuus muodonmuutoksista on hyvin suuri.



Kuva 4.14. *Stabiloituvan käyttäytymisen (shakedown) saavuttaminen suurilla aksiaalisilla muodonmuutoksilla Lackenby et al. (2007) syklisissä kolmiaksaalikokeissa. Vasemmalla aksiaaliset muodonmuutokset ja oikealla tilavuusmuodonmuutokset syklimäärän suhteen.*

Todellisissa tukikerroksissa miljoonia kertoja toistuvan junakuormituksen aiheuttamien pysyvien muodonmuutosten kehittyminen ja suuruusluokka on tukemistoimenpiteiden vaikutus huomioiden vaikeasti ymmärrettävä kokonaisuus. Huomioitavaa on myös se, että tukikerroksessa tapahtuvat pysyvät muodonmuutokset johtavat junan aiheuttaman kuormituksen välittymiseen tasaisemmin useamman ratapölkyn kautta ja toisaalta myös tasaisemmin yksittäisen ratapölkyn alapinnalla, jolloin välittömästi pyörän alla olevasta ratapölkystä tukikerrokseen kohdistuva maksimikuormitus pienenee. Raidesepelin pysyvät muodonmuutokset siten muokkaavat kuormitus-tilannetta tukikerroksen kannalta paremmin kestäväksi, joskin seurauksena on raidetta kuormittava lisääntyvä palautuva siirtymä sekä ratapölkyn lisääntynyt venymärasitus. Muissa yhteyksissä tehdyt kenttähavainnot tukikerrosten leviämisestä osin myös alusrakennekerrosten sisään painuneena puoltaa sitä, että hyvinkin suurilla muodonmuutostasoilla Indraratna et al.(1998) ja Lackenby et al. (2007) mukaisesti tehtävä tarkastelu voi olla raidesepelissä perusteltua, vaikka siinä on selvä ristiriita perinteisiin karkearakeisten kiviainesten pysyvien muodonmuutosten arviointimenettelyihin. Tarkastelujen periaatteellista eroa kuvaa esimerkkinä standardin SFS-EN 13286-7 ohjeistus kokeen keskeytyksestä yli 2 % muodonmuutoksilla tai standardin liitteen C.4 mukainen 'plastic shakedown limit'-määrittäminen, jossa tarkastellaan aivan eri kertaluokkaa olevia pysyviä muodonmuutoksia (<0,0045 % / 2000 kuormitus sykliä).

4.7.2 Käytännön sovellutuksia lähellä olevia tarkasteluja

Kirjallisuudessa havaittiin myös muutama raidesepelin kolmiakσιαallinen kuormitus-tarkastelu, jotka ovat sovellettavissa nimenomaan sepelinpuhdistuksen, rakeiden kulumisen ja vaakasuuntaisen jännitystilän merkityksen arviointiin.

Japanissa (Hokkaido University, Sapporo) vaikuttava Ishikawa (2005) raportoi tavoitteiltaan tämän työn kolmiakσιαalikoeosuuden kanssa hyvin samantyyppisestä tarkastelusta koskien sepelinpuhdistuksessa rataa palautettavan materiaalin pyöristyneisyyden merkitystä sepelin muodonmuutosominaisuuksiin. Hän kulutti raidesepeliä Los Angeles-myllyssä muodoltaan pyöristyneemmäksi ja vertasi kahta eriasteisesti pyöristettyä raidesepeliä uuteen, terävasärmäiseen raidesepeliin staattisessa kolmiakσιαalikokeessa sekä syklistä kuormituksessa radan täyden mittakaavan mallikokeessa. Ishikawa myös määrittä digitaalikamerakuvista matemaattisia parametreja kuvaamaan raemuotoa. Staattiset kolmiakσιαalikokeet osoittivat, että materiaalin murtolujuus (maksimi deviatorinen jännitys) aleni huomattavasti raemuodon pyöristytessä. Pyöristyneimmän sepelin maksimi deviatorinen jännitys oli noin 40 % alhaisempi kuin terävasärmäisellä sepelillä. Indraratna & Salim (2005) raportoivat samankaltaisista tarkasteluista radasta otetun hienontuneen sepelin ja suurelta osin samasta kiviaineksesta koostuneen uuden, terävasärmäisen sepelin staattisissa kolmiakσιαalikokeissa. Myös heidän havaintonsa mukaan maksimi deviatorinen jännitys oli terävasärmäisessä sepelissä selvästi suurempi.

Ishikawan (2005) raportoinnissa radan täysimittakaavaisessa mallikokeessa 300000 kuormitus syklin vaikutuksesta havaittiin, että melko nopeasti tapahtuva ratapölkyn alkupainuma oli pyöristyneintä sepeliä käytettäessä 26 % suurempi ja sen jälkeinen painuman kehittymisnopeus 15 % suurempi kuin terävasärmäisellä raidesepelillä. Raemuotoa kuvaava parametri korreloi sekä staattisessa kolmiakσιαalikokeessa määritetyn murtolujuuden ja kimmomoduulin että syklistä mallikokeessa havaittujen painumakehitystä kuvaavien parametrien kanssa. Ishikawa ei kuitenkaan sovello havaintoja rataa palautettavan sepeliin merkityksen arviointiin, vaan toteaa, että lisätutkimuksia on tarpeen tehdä ennen soveltamismahdollisuuksia käytäntöön.

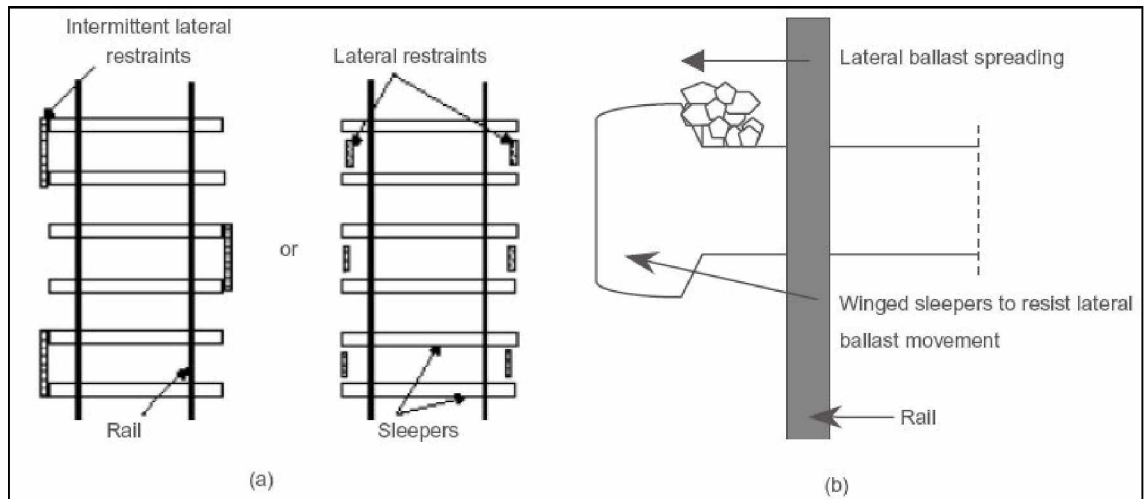
Indraratna & Salim (2003, 2005) raportoivat toisesta läheisesti omaan kokeellisen tutkimusosuuden aihepiiriä käsittelevästä tutkimuksesta. He sovelsivat perinteisen kolmiakσιαalikokeen sijaan liikkuvaseinästä laatikkoa, jossa on saatu aikaan kolmiakσιαalisesti säädelty jännitystila. He tarkastelivat 500000 kuormitus syklin vaikutusta uuden, terävasärmäisen ja vanhan, kierrätetyn raidesepelin muodonmuutoksiin. Kierrätettyä raidesepeliä testattiin kuivana ja vedellä kyllästettynä sekä myös tukikerroksen ja sen alapuolisen suodatinkerroksen väliin asennetun geosynteetin kanssa. Tuloksena todettiin sepelin pysty- ja vaakasuuntaiset muodonmuutokset samoin kuin hienoneminen uudella raidesepelillä hyvin selvästi pienemmäksi kuin kierrätetyllä sepelillä. Kierrätetty sepeli *hienoni* miltei kaksinkertaisesti verrattuna terävasärmäiseen uuteen sepeliin. Pääsyyksi arvioidaan kierrätettyyn sepeliin aikaisemman kuormituksen aikana syntyneitä mikrorakoja, jota ilmensi myös uuteen sepeliin nähden 35 % alhaisempi sepelirakeen vetolujuus.

Geosynteetin vaikutuksesta kuivan kierrätyssepelin *pystysuuntainen muodonmuutos* saatiin samalle tasolle kuin terävasärmäisen. Vastaavasti kuivan kierrätyssepelin *vaakasuuntaiset muodonmuutokset* saatiin geosynteetin vaikutuksesta jopa pienemmäksi kuin terävasärmäisen sepelin ilman geosynteettiä. Myös kyllästetyissä

olosuhteissa geosynteetistä saatu hyöty muodonmuutosten pienentämisessä oli merkittävä. Geosynteetin ansiosta pienentyneiden muodonmuutosten seurauksena kierrätetyn sepelin hienoneminen aleni miltei kaksinkertaisesta samalle tasolle uuden sepelin kanssa. Tutkimuksissa tarkasteltiin useiden eri geosynteettien periaatteellista soveltuvuutta tarkoitukseen. Geosynteetin merkitys perustuu sen tasossa tapahtuvan rakeiden välisen liikkeen vaikeutumiseen ja näennäisen sisäisen kitkan lisääntymiseen sepeli-geosynteetti-kontaktin myötä.

Yksi mielenkiintoinen tutkimushavaintojen sovellus liittyy sellipaineen merkityksen pohjalta tehtyihin ehdotuksiin tukikerroksen vaakasuuntaisten liikkeiden rajoittamiseksi. Junakuorman alla radan poikittaissuunnassa vaikuttavasta vaakajännityksestä ei tarkastellussa kirjallisuudessa havaittu mittaustietoihin pohjautuvaa tietoa. Asiaa on monitahoinen ja sitä tulisi pyrkiä jatkossa tarkastelemaan kokeellisesti. Tukikerroksen alhaisesta sivuttaistuesta johtuen on selvää, että rakeiden pinnan karkeudella ja sen mahdollistamalla lukkiutumisella on määräävä rooli radan poikittaissuuntaisiin jännityksiin tukikerroksessa. Indraratna et al. (2005) arvioivat tukikerroksessa vaikuttavaksi radan poikittaissuuntaiseksi jännitykseksi 5-40 kPa. Indraratna & Salim (2005) arvioivat radalla tehtyjen mittausten puuttuessa vastaavasti poikittaissuuntaisen jännityksen suuruusluokaksi 10–20 kPa. Toisaalta Raymond & Davies (1978) arvioivat, että sivusuuntainen jännitys tukikerroksessa ei todennäköisesti ylitä 140 kPa. Lackenby et al. (2007) totesivat, että tukikerroksen vaakajännityksiä vastaavilla sellipaineilla syklisissä kolmiaksaalikokeissa muodostui suuria aksiaalisia muodonmuutoksia, dilataatiota ja voimakasta hienonemista. Sellipaineen lisäys pienensi muodonmuutoksia dramaattisesti, mikä oli nähtävissä myös oman kokeellisen osuuden tuloksista. Havaintojen pohjalta tukikerroksessa vaikuttavaa vaakajännitystä tulisi lisätä erityisesti raskailla akselipainoilla. Tätä varten käytäntöön sovellettavina vaihtoehtoina he esittävät useita mielenkiintoisia vaakasuuntaista sepelin liikettä estäviä ratkaisuja, joiden kenttätästä on käynnissä:

- ratapölkkyjen väleihin tai päihin asennettavia levymäisiä esteitä (kuva 4.15),
- ratapölkyn pään muotoilua (kuva 4.15),
- ratapölkkyvälin tihentämistä,
- palteen korottamista ja tukikerroksen lisätiivistämistä,
- geosynteettien käyttöä tukikerroksen pohjalla tai
- paremmin lukkiutuvaa tukikerrosmateriaalia.



Kuva 4.15. Raidesepelin vaakasuuntaisen liikkeen rajoittamiseen ja vaakasuuntaisen jännityksen lisäämiseksi esitettyjä ratkaisuja Lackenby et al. (2007).

Raidesepelin muodonmuutoskäyttäytymistä koskevia kirjallisuuslähteitä tulisi arvioida kokeellisten jatkotutkimusten tukena tarkemmin. Erityisesti huomiota tulee kiinnittää tukikerroksen todelliseen tiiviys- ja jännitystilaan sekä tarkasteltavien muodonmuutosten mielekkääseen suuruusluokkaan. Arvioitavaksi tulisi ottaa myös syklisessä kuormituksessa tapahtuvan raidesepelin hienonemisen ja pysyvät muodonmuutokset huomioivien konstitutiivisten mallien (Salim 2004) perusteet ja soveltamismahdollisuudet. Kirjallisuudessa havaittiin edellä referoitujen tutkimusten lisäksi useita muita samaan aihepiiriin liittyviä julkaisuja, joita ei ollut tämän työn puitteissa kuitenkaan mahdollista tarkastella.

5 Päätelmät ja jatkotutkimustarpeet

5.1 Yleiset huomiot sepelinpuhdistuksesta ja kirjallisuudesta

- Puhdistettavan tukikerroksen hienontuneisuus määrittelee suurelta osin seulontakoneen etenemisnopeuden ja puhdistustuloksen. Seulaston hetkellinen tukkeutuminen johtaa siihen, että rataaan palautuu myös hienorakeista ainesta. Esimerkkikohteen Toijala–Turku sepelinpuhdistuksen laadunvalvonnassa näytteistä noin viidennes oli hieman rataaan palautettavan sepelin ohjeellista rakeisuutta (RHK 1998) hienorakeisempia. Puhdistettavan tukikerroksen rakeisuus vaihtelee paikallisesti huomattavasti, mistä syystä on luonnollista, että myös rataaan palautuvan sepelin määrä ja rakeisuus vaihtelevat merkittävästi. Sen seurauksena myös puhdistetun tukikerroksen rakeisuudessa on eroja.
- Moderni 3d-maatutkaus tuottaa jatkuvaa dataa tukikerroksen hienontuneisuudesta ja mahdollistaa siten hienontuneimpien osaosuuksien erottelun. Uutta menetelmää on jatkossa mielekästä hyödyntää etenkin kunnossapitoon liittyvien sepelinpuhdistusten kohdentamisessa, mutta myös perusparannusten yhteydessä, jolloin puhdistus voidaan kohdentaa koko rataverkolla nopeusrajoitusten kannalta kriittisimmille osaosuuksille ja samalla puhdistuskilometrimäärällä saadaan suuremmat toiminnalliset hyödyt.
- Korkeusviivan nostoista ja pohjamaan painumisista johtuen tukikerrospaksuus on usein tavallista suurempi. Sepelinpuhdistus on tällöin tärkeää ulottaa riittävän alas, jotta tukikerroksen alaosaan, välikerroksen pinnalle, rikastunut hienorakeinen aines tulee poistetuksi. Ongelmalliseksi riittävän puhdistussyvyyden toteuttaminen muodostuu routaeristetyissä rakenteissa, kun välittömästi tukikerroksen alla sijaitseva routalevy on edelleen toimintakykyinen ja siten tarkoitus jättää ehjänä rakenteeseen. Mikäli em. hienorakeista kerrosta ei seulonnan yhteydessä puhdisteta, rakenteeseen voi jäädä routimisherkkä kerros ja puhdistuksesta saatu hyöty on siinä suhteessa vähäinen
- Raidesepelin hienontuneisuuden kannalta elinkaaritaloudellisimman sepelinpuhdistusajankohdan määrittämistä tulisi lähestyä jatkotarkasteluissa raidegeometrian poikkeamatietojen ja kunnossapitotietojen sekä tukikerros-materiaalin kunnon välisen yhteyden tarkasteluilla huomioiden toimenpiteiden ja materiaalien kustannustiedot.
- Kirjallisuudessa esitetyt raidesepelin kolmiakksiaalikoetarkastelut sisältävät keskenään joitakin periaatteellisia eroja. Käytännön sovellutuksia ajatellen kirjallisuudessa esitettiin kuitenkin mielenkiintoisia havaintoja tukikerroksen pohjalle sepelinpuhdistuksen yhteydessä asennettavan geosyntecin tarjoamasta huomattavasta hyödystä sepelin muodonmuutosten ja hienonemisen vastustamisessa. Tukikerroksen toimintakykyä merkittävästi parantavan poikittaisuuntaisen tuen lisääntymistä saattavat tarjota myös Australiassa kenttätestausvaiheeseen edenneet tukikerrokseen asennettavat levymäiset esteet ja ratapölkyn pään muotoilu.

- Raidesepelin muodonmuutuskäyttäytymistä koskevia kirjallisuuslähteitä tulisi arvioida kokeellisten jatkotutkimusten tukena tarkemmin. Erityisesti huomiota tulee kiinnittää tukikerroksen todelliseen tiiviys- ja jännitystilaan sekä tarkasteltavien muodonmuutosten mielekkääseen suuruusluokkaan, jossa kirjallisuuslähteiden välillä oli dramaattisia eroja. Tiiviystilan suhteen asiaa monimutkaistaa raidesepelin tukeminen ja sen aiheuttama löyhtyminen. Tästä syystä tarvittaisiin kokeellisia lisäselvityksiä tukikerroksen todellisesta tiiviytilasta kunnossapitosyklar ja liikennekuormituksen eri vaiheissa ja erilaisilla raidesepelin rakeisuuksilla. Junakuorman alla radan poikittaissuunnassa vaikuttavasta vaakajännityksestä ei tarkastellussa kirjallisuudessa havaittu mittautustietoihin pohjautuvaa tietoa. Suhteellisen kapeassa radan tukikerroksessa vaakasuuntainen tuki saattaa olla siinä määrin heikko, että vaakasuuntaisen jännityksen on mahdollista kasvaa junakuorman kasvaessa vain vähän. Asia on merkitykseltään suuri, joten sitä tulisi pyrkiä jatkossa tarkastelemaan kokeellisesti. Arvioitavaksi tulisi ottaa myös syklisessä kuormituksessa tapahtuvan raidesepelin hienonemisen ja pysyvät muodonmuutokset huomioivien konstitutiivisten mallien perusteet ja soveltamismahdollisuudet.

5.2 Tukikerroksen rakeisuus sepinpuhdistuksen eri vaiheissa

- Ratapölkyn päiden välissä tasolla Kv-30...40 cm keskimääräinen rakeisuusluku (1 mm, 8 mm ja 25 mm läpäisyprosenttien summa) oli ennen sepelinpuhdistusta 79, rataa palautetussa sepelissä 8 ja sepelinpuhdistuksen sekä alkutuntojen jälkeen 19. Koska hienorakeinen aine valuu huokostilassa tukikerroksen pohjalle, alkutuntojen jälkeen rakeisuusluku oli em. kohdan alapuolella näytteissä keskimäärin jopa 25. Raiteen keskellä sepelinpuhdistuksen jälkeinen rakeisuus oli etenkin tukikerroksen alaosissa selvästi karkearakeisempi kuin ratapölkyn päiden välissä. Näin ollen on selvää, että alkutuenta ja ensimmäiset junan ylitykset hienontavat raidesepeliä voimakkaasti tukemisalueella ja ratapölkystä välittyvän junakuormituksen ensisijaisella kohdistumisalueella.
- Tukikerroksen teoreettisena puhdistusrajana pidetyn rakeisuusluvun 88–90 tasolle hienontuneesta tukikerroksesta rataa palautuu vain noin 35 %. Koska puhdistusrajalle hienontuneen tukikerroksen kuivairtotiheys (suuruusluokka 2,2 t/m³) on kuitenkin jopa 40 % suurempi kuin uuden tukikerroksen (suuruusluokka 1,6 t/m³), 35 % palautuva osuus vastaa noin 47 % osuutta puhdistetussa tukikerroksessa. Rataa palautuvan sepelin määrää ja täydennyssepin tarvetta voidaan työssä esitetyn yhteyden perusteella arvioida tukikerroksesta ennen puhdistusta määritetyistä rakeisuusluvuista. Kyseinen yhteys oli suuruusluokaltaan yhtenevä myös yksittäisissä tarkastelukohteissa (5 kpl) sepelinpuhdistuksen jälkeen tehtyjen kiviainesten lajittelujen havaintoihin.
- Sepelinpuhdistuksen työmenetelmästä johtuen on luonnollista, että täydennyssepin osuuden havaittiin alenevan merkittävästi mentäessä tukikerroksessa alaspäin. Vastaavasti raiteen keskellä täydennyssepin suhteellinen osuus todettiin hieman suuremmaksi kuin ratapölkyn päiden välissä. Asialla on periaatteellista merkitystä sikäli, että lujan täydennyssepin lisähyöty on vähäinen, mikäli kuormituksen välittämisen kannalta kriittisimmissä tuki-

kerroksen osissa pääasiallinen kiviaines on kuitenkin vanha rataa palautettu sepeli. Jotta lujaa ja karkearakeista täydennyssepeliä saataisiin mahdollisimman runsaasti kuormitusten kannalta kriittisimmille alueille ratapölkyn päihin, palautettavaa sepeliä olisi edullista ohjata mahdollisimman runsaasti raiteen keskelle. Tätä kuitenkin rajoittaa puhdistus- ja sepelöintikaluston kulun mahdollistaminen ratapölkkyjä vaurioittamatta. Täydennyssepelin sekoittumista myös tukikerroksen alempiin osiin voitaisiin jossain määrin edesauttaa sepelinpuhdistusta edeltävällä runsaalla sepelöinnillä.

- Lujan täydennyssepelin ei voitu micro-Deval- ja Los Angeles-testeissä havaita systemaattisesti kiihdyttävän lujuudeltaan heikomman rataa palautetun kiviaineksen hienonemista.
- Sepelinpuhdistuksessa syntyvä hylkysepeli sijoitettiin molemmilla tarkastelluilla rataosilla penkereen levitykseksi. Noin 80 % materiaaleista ylitti hienoainespitoisuutensa suhteen radan rakennekerrosten materiaalien käytännöllisen routimattomuuden rajaksi arvioidun 2,7 %. Kyseisessä rakenteen kohdassa materiaalin routimisherkkyydellä ei kuitenkaan liene juurikaan vaikutusta radan toimivuuteen. Keskeisempi vaikutus pengerlevitysmateriaalilla on rakenteen kuivatukseen. Hienoainespitoisuus indikoi epäsuorasti myös tästä vaikutuksesta, mutta absoluuttisen vaikutustason arviointi edellyttäisi lisätutkimuksia.

5.3 Muodonmuutosominaisuudet

- Raidesepelin *palautuvan* muodonmuutuskäyttäytymisen osalta selkeä ja systemaattinen havainto kolmiakselialikokeissa oli, että resilient-moduuli pienenee aluksi nopeasti rakeisuusluvun kasvaessa, mutta rakeisuusluvun edelleen lisääntyessä resilient-moduulin alentuminen hidastuu. Rakeisuuden kautta resilient-moduulin yhteys on vastaava tukikerroksen irtotiheyteen, sillä karkearakeisen sepelin irtotiheys on runsaan huokostilan myötä alhainen. Käytännön merkitystä havainnollistaen tämä ilmentää suurempaa palautuvaa joustoa junakuorman alla hienontuneessa ja siten huokostilaltaan tukkiutuneessa tukikerroksessa. Tarkasteltujen materiaalien ääripäiden suhteellisia jäykkyyserojen kuvaamiseksi voidaan todeta, että jäykimmän uuden karkearakeisen sepelin resilient-moduuli oli yli kaksinkertainen verrattuna heikoimpaan tarkasteltuun hylkysepelin.
- Uuden karkearakeisen ja terävasärmäisen sepelin tarve kierrätyssepelin seassa on sikäli merkittävä, että rataa palautettujen pyöristyneiden rakeiden muodostaman materiaalin jäykkyys ei ollut ilman täydentävää uutta terävasärmäistä materiaalia oleellisesti parempi kuin hienontuneella tukikerrosmateriaalilla ennen sepelinpuhdistusta. Vaikka uuden ja palautetun sepelin seoksilla jäykkyys oli samaa luokkaa uuden sepelin kanssa, pitkissä koesarjoissa saatiin viitteitä siitä, että palautetun ja uuden sepelin seoksen resilient-moduuli jää kuitenkin suuremmilla kuormitustasoilla (akselipainoilla) uutta sepeliä alhaisemmaksi. Tämä ilmentää uuden terävasärmäisen sepelin roolin tärkeyttä erityisesti suuremmilla akselipainoilla.
- Rakeiden pinnan kuluneisuuden vaikutuksen tarkasteluun suoraan sovellettavissa ollut aineisto oli suppea, mistä syystä vaikutus jäi osittain epämääräiseksi.

Keskenään vertailukelpoisilla rakeisuuksilla molemmissa tarkastelluissa tapauksissa uudessa sepelissä jäykkyys oli erityisesti suuremmilla jännitystasoilla (akselikuormilla) hieman suurempi kuin kuluneessa sepelissä. Pysyvien muodonmuutosten osalta eroa ei voitu havaita. Raemuodon vaikutusta voitaisiin jatkossa tarkastella vaihtoehtoisesti samaa alkuperää olevista materiaaleista, joita on kulutettu keinotekoisesti esimerkiksi Los-Angeles-myllyssä.

- *Pysyvien* muodonmuutosten osalta erot kolmiaksiaalikokeissa olivat selvästi epämääräisempiä kuin resilient-moduulin suhteen. Myös rakeisuuden vaikutus pysyviin muodonmuutoksiin oli hieman ristiriitainen. Tähän voi vaikuttaa se, että kokeissa käytetty vesipitoisuus saattoi olla sopiva materiaalia lujittavan näennäisen koheesion muodostumiselle hienorakeisissa materiaaleissa. Tällöin hienorakeisten materiaalien käyttäytyminen olisi huomattavasti heikompa vedellä kyllästyneessä tilassa, jossa materiaaleja ei tämän työn puitteissa ollut mahdollista testata. Periaatteellinen kysymys on myös kuormitussuunnaltaan vakiodun kolmiaksiaalikokeen soveltuvuus liikkuvan pyöräkuorman simulointiin pysyvien muodonmuutosten tarkastelemiseksi sekä sovelletun näyttekoon riittävyys erityisesti raideseppelin kaltaiselle karkea- ja tasarakeiselle materiaalille.
- Pysyvien muodonmuutosten vastustuskyvyn osalta koetulosten ääripäässä parhaan materiaalin ‘plastic creep limit’iä’ vastaava deviatorisen maksimijännityksen maksimi (q_{max_limit}) oli keskimäärin 32 % suurempi kuin heikoimman. Parhaan materiaalin poikkeava esikuormitus herätti epäilyksen sen merkityksestä muodonmuutuskäyttäytymiseen.
- Vaihteluvälin 30–150 kPa sisällä tapahtuva 20 % lisäys sellipaineessa mahdollisti keskimäärin 10–16 % lisäyksen kuormituspulssiin pysyvien muodonmuutosten säilyessä samalla tasolla. Havainto on rinnastettavissa suoraan tukikerroksen vaakajännitystilän lisäämisestä saataviin hyötyihin akselikuorman korottamisessa (tai muodonmuutosten pienentämisessä). Kirjallisuudessa (Lackenby et al. 2007) esitetyillä tukikerroksen vaakajännitystilaa lisäävillä keinoilla voitaisiin mahdollisesti saavuttaa merkittäviä etuja akselikuorman kasvattamiseksi. Sivuttaistukea kasvattamalla saatavien hyötyjen tarkastelu vaikuttaa erityisen mielekkäältä, koska materiaalivalinnoilla toteutettavissa olevat pysyvien muodonmuutosten rajoittamismahdollisuudet jäivät kolmiaksiaalikokeissa hieman epäselviksi ja käyttäytymisen ääripäiden välinen ero suhteellisen pieneksi.
- Radan kunnossapitotoimenpiteenä tehtävän raiteen tukemisen vaikutus on kaksijakoinen. Menetelmän selkeä haitta on raideseppelin merkittävän jauhamisen lisäksi se, että tukemishakut löyhentävät tukikerrosta, jolloin hienorakeista ainesta sisältävässä tukikerroksessa materiaali tiivistyy nopeasti heti tukemisen jälkeisten junien seurauksena. Tilanne korostuu hienorakeisen aineksen määrän lisääntyessä ja lopulta tukeminen on tehotonta. Britanniassa käytössä oleva tukemiselle vaihtoehtoinen ‘stoneblowing’-menetelmä on sepeliä vähemmän hienontava, mutta ennen kaikkea se ei sekoita liikennekuormituksen alla tiivistynyttä tukikerrosta. Kirjallisuudessa esitetyt tutkimukset puoltavat ‘stoneblowing’-menetelmää ja sen sovellettavuutta Suomeen tulisi arvioida tarkemmin.

Kirjallisuusviitteet

ERRI, European Rail Research Institute (1994). Determining the criteria for ballast durability using triaxial tests. ERRI Report D182/ RP3. Utrecht. 71 p. + 17 app. p.

Fair, P. (2003). The Geotechnical behaviour of ballast materials for railway track maintenance. PhD Thesis. University of Sheffield. 290 p.

Indraratna, B. & Ionescu, D. & Christie, D. (1998). Shear behavior of railway ballast based on large-scale triaxial tests. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. Vol. 124, No. 5, May 1998, pp. 439-449.

Indraratna, B. & Lackenby, J. & Christie, D. (2005). Effect of confining pressure on the degradation of ballast under cyclic loading. *Géotechnique*. Vol. 55, No. 4, pp. 325-328.

Indraratna, B. & Salim, W. (2003). Deformation and degradation mechanics of recycled ballast stabilised with geosynthetics. *Soils and Foundations*. Vol. 43, No. 4, pp. 35-46.

Indraratna, B. & Salim, W. (2005). Mechanics of ballasted rail tracks; A geotechnical perspective. London, Taylor & Francis. 226 p.

Ishikawa, T. (2005). Effect evaluation of particle shape on cyclic deformation of railroad ballast. Technical report by Japanese domestic committee on geotechnics of particulate media technical committee (TC35). The Japanese Geotechnical Society. Pp. 6-31 – 6-37.

Jefferies, T. (1989). Towards ballast life cycle costing. Proceedings of the Fourth International Heavy Haul Railway Conference, Brisbane, 11-15 September, pp. 439-445.

Key, A.J. (1998). Behaviour of two layer railway track ballast under cyclic and monotonic loading. PhD Thesis. University of Sheffield. 247 p.

Kolisoja, P. (1994). Sitomattomien kerrosten kiviainesten muodonmuutosominaisuudet – Vuoden 1993 kuormituskokeet. Tielaitoksen selvityksiä 28/1994. Helsinki, Tielaitos. 119 s. ja 28 liites.

Kolisoja, P. (1996). Large scale dynamic triaxial tests, I. Delprosjektrapport KPG 05. Høvik, Arbeidsfellesskapet KPG. 31 p. + 50 app. p.

Kolisoja, P. (1997). Resilient deformation characteristics of granular materials. PhD Thesis. Tampere University of Technology Publications 223. 188 p. + 13 app. p.

Kolisoja, P. (1998). Large scale dynamic triaxial tests, III. Delprosjektrapport KPG 20. Oslo, Arbeidsfellesskapet KPG. 50 p. + 49 app. p.

Lackenby, J. & Indraratna, B. & McDowell, G. & Christie D. (2007). Effect of confining pressure on ballast degradation and deformation under cyclic triaxial loading. *Géotechnique*. Vol. 57, No. 6, pp. 527-536.

Nurmikolu, A. (2000). Raidesepelin lujuuden vaikutus tukikerroksen kestoikään. Ratahallintokeskuksen julkaisuja A 4/2000. Helsinki, Ratahallintokeskus. 93 s. ja 34 liites.

Nurmikolu, A. (2004). Murskatun kalliokiviaineksen hienoneminen ja routivuus radan rakennekerroksissa; Kirjallisuusselvitys. Ratahallintokeskuksen julkaisuja A 4/2004. Helsinki, Ratahallintokeskus. 193 s.

Nurmikolu, A. (2006). Ratarakenteessa käytettävien kalliomurskeiden hienoneminen ja routimisherkyys; Kokeellinen tutkimusosuus. Ratahallintokeskuksen julkaisuja A 9/2006. Helsinki, Ratahallintokeskus. 170 s. ja 44 liites.

Passi, T. (2007). Maatutkatekniikan hyödyntäminen radan tukikerroksen kunnon arvioinnissa. Ratahallintokeskuksen julkaisuja A 8/2007. Helsinki, Ratahallintokeskus. 84 s. ja 18 liites.

Ratahallintokeskus (1997). Sepelitukikerroksen laadun tutkimusohje. 24.6.1997. 3 s.

Ratahallintokeskus (1998). Päälysrakennetöiden yleiset laatuvaatimukset; Tukikerroksen vaihto-/puhdistustyön yleiset laatuvaatimukset. Helsinki, Ratahallintokeskus. 7 s.

Ratahallintokeskus (2002). Ratatekniset ohjeet, RATO, osa 15: Radan kunnossapito. 63 s.

Ratahallintokeskus (2004). Standardin SFS-EN 13450 Raidesepelikiviainekset kansallinen soveltamisohje. Helsinki, Ratahallintokeskus. 7 s.

Raymond, G.P. & Bathurst, R. (1994). Repeated-load response of aggregates in relation to track quality index. *Canadian Geotechnical Journal*. Vol 31, pp. 547-554.

Raymond, G.P. & Davies, J. (1978). Triaxial tests on a dolomite railroad ballast. *Journal of the Geotechnical Engineering Division*. Vol. 104, No. GT6, June, pp. 737-751.

Raymond, G.P. & Diyaljee, V. (1979). Railroad ballast sizing and grading. *Journal of the Geotechnical Engineering Division*. Vol. 105, No. GT5, May, pp. 676-681.

Raymond, G.P. & Williams, D. (1978). Repeated load triaxial tests on a dolomite ballast. *Journal of the Geotechnical Engineering Division*. Vol. 104, No. GT7, July, pp. 1013-1029.

Roelfeldt, M. (1980). A Study of mechanical degradation of a coarse aggregate subject to repeated loading. Master of Science Thesis. University of Missouri-Rolla. 77 p.

Salim, W. (2004). Deformation and degradation aspects of ballast and constitutive modelling under cyclic loading. PhD Thesis. University of Wollongong. 250 p. + 13 app. p.

SFS-EN 1097-2:1998. Kiviainesten mekaanisten ja fysikaalisten ominaisuuksien testaus. Osa 2: Iskunkestävyyden määrittämismenetelmät. SFS. 23 s.

SFS-EN 1097-1+A1:2003. Kiviainesten mekaanisten ja fysikaalisten ominaisuuksien testaus. Osa 1: Kulutuskestävyyden määrittäminen (micro-Deval). SFS. 11 s.

SFS-EN 13286-7:2004. Sitomattomat ja hydraulisesti sidotut seokset. Osa 7: Syklinen kolmiakσιαalikoe sitomattomia kiviainesseoksia varten.

SFS-EN 13450:2003. Raidesepelikiviainekset. SFS. 32 s.

Silvast, M. & Nurmikolu, A. (2005). Radan päällys- ja alusrakenteen tutkiminen maatutkalla. Ratahallintokeskuksen tutkimusraportti 29.8.2005. 40 s. ja 17 liites. Julkaisematon.

Silvast, M. & Nurmikolu, A. (2008). Ratasepelitutkimus rataosuudella Suonenjoki-Iisalmi. Ratahallintokeskuksen tutkimusraportti 15.2.2008. 41 s. ja 28 liites. Julkaisematon.

Skoglund, K.A. (2002). A Study of some factors in mechanistic railway track design. PhD Thesis. Norwegian University of Science and Technology, Department of Road and Railway Engineering. 160 p. + 36 app. p.

Taulukko A.1. Yhteenvedo Tjl-Tku rataosan rakeisuusnäytteiden pesuseulontatuloksista.

Km	Pääty / kesk & syvyys Kv:stä	Näyt- teen tyyppi	Läpäisyprosentti seulalla					Rakeisuus- luku	
			31,5 mm	25 mm	8 mm	1 mm	0,063 mm		
Toijala-Turku	184+527	P 30-40	ennen	59.4	41.4	15.8	6.8	1.8	64
	187+974	P 30-40	ennen	74.5	58.9	27.0	11.9	3.5	98
	257+608	P 30-40	ennen	68.6	50.8	19.7	8.2	2.1	79
	264+974	P 30-40	ennen	75.8	54.0	25.1	9.9	2.8	89
	267+025	P 30-40	ennen	71.1	56.1	27.5	12.0	2.9	96
	174+580		palaute	7.0	0.7	0.6	0.6	0.2	2
	174+980		palaute	10.2	1.1	0.7	0.6	0.2	2
	179+240		palaute	12.6	4.8	4.8	4.4	0.8	14
	181+100		palaute	15.5	3.2	0.6	0.5	0.3	4
	181+560		palaute	2.2	0.6	0.4	0.4	0.2	1
	183+020		palaute	5.8	1.2	1.0	1.0	0.3	3
	263+080		palaute	41.8	10.0	1.5	1.4	0.5	13
	264+980		hylky	95.5	84.7	47.1	21.9	6.1	154
	152+554	P 20-30	jälkeen	16.1	3.6	0.3	0.3	0.2	4
	152+554	P 30-40	jälkeen	49.2	17.7	0.6	0.6	0.3	19
	152+554	P 40-50	jälkeen	44.1	23.1	1.5	1.1	0.4	26
	152+554	K 20-30	jälkeen	10.6	2.3	0.2	0.2	0.1	3
	152+554	K 30-40	jälkeen	25.3	8.2	0.3	0.3	0.1	9
	152+554	K 40-50	jälkeen	26.9	6.3	0.3	0.3	0.2	7
	177+140	P 20-30	jälkeen	28.4	8.4	0.5	0.5	0.3	9
	177+140	P 30-40	jälkeen	38.5	17.7	1.0	0.9	0.5	20
	177+140	P 40-50	jälkeen	51.9	25.7	3.4	2.5	1.0	32
	177+140	K 20-30	jälkeen	16.4	9.0	0.5	0.5	0.3	10
	177+140	K 30-40	jälkeen	27.4	10.3	2.0	1.5	0.6	14
	177+140	K 40-50	jälkeen	28.7	12.1	3.2	2.0	0.7	17
	264+980	P 20-30	jälkeen	16.2	2.7	1.1	1.1	0.5	5
	264+980	P 30-40	jälkeen	15.4	4.2	1.3	1.3	0.9	7
	264+980	P 40-50	jälkeen	32.8	13.8	3.1	2.4	1.0	19
	264+980	K 20-30	jälkeen	7.3	1.7	1.3	1.1	0.4	4
	264+980	K 30-40	jälkeen	4.6	2.8	1.5	1.3	0.5	6
	264+980	K 40-50	jälkeen	10.7	6.9	1.4	1.2	0.6	9

Taulukko A.2. Yhteenvedo Kuo-Slj rataosan rakeisuusnäytteiden pesuseulontatuloksista.

Km	Pääty / kesk & syvyys Kv:stä	Näyt- teen tyyppi	Läpäisyprosentti seulalla					Rakeisuus- luku	
			31,5 mm	25 mm	8 mm	1 mm	0,063 mm		
Kuopio – Siilinjärvi	469+445	P 30-40	ennen	66.4	45.9	17.4	7.9	2.4	71
	477+396	P 30-40	ennen	70.7	53.1	20.8	11.1	3.9	85
	486+095	P 30-40	ennen	53.0	35.9	8.7	4.7	1.8	49
	470+490		palaute	21.5	5.3	2.2	1.9	0.5	9
	470+490		hylky	89.5	77.8	57.8	35.6	4.7	171
	470+490	P 20-30	jälkeen	5.5	1.6	0.5	0.5	0.4	3
	470+490	K 20-30	jälkeen	8.9	4.3	0.8	0.7	0.5	6
	470+490	P 30-40	jälkeen	25.5	11.2	1.1	1.0	0.7	13
	470+490	K 30-40	jälkeen	13.1	4.8	0.8	0.6	0.4	6
	470+490	P 40-50	jälkeen	25.6	14.6	2.3	1.2	0.6	18
	470+490	K 40-50	jälkeen	13.7	4.5	0.4	0.3	0.2	5
	470+490	P 50-60	jälkeen	19.4	16.0	8.5	3.4	0.8	28
	470+490	K 50-60	jälkeen	21.0	12.3	2.7	1.3	0.4	16
	477+921	P 30-40	jälkeen	45.5	20.7	3.3	2.5	0.9	26
	486+095	P 20-30	jälkeen	19.5	7.1	2.3	2.2	0.8	12
	486+095	K 20-30	jälkeen	9.3	4.9	0.8	0.5	0.3	6
	486+095	P 30-40	jälkeen	51.3	23.3	4.3	3.8	1.4	31
	486+095	K 30-40	jälkeen	14.4	5.1	1.1	0.8	0.5	7
	486+095	P 40-50	jälkeen	46.3	20.8	5.2	3.9	1.2	30
	486+095	K 40-50	jälkeen	24.5	11.0	2.7	2.2	0.8	16

Taulukko A.3. Yhteenveto Geopalvelu Oy:n tekemistä kuivaseulonnoista Tjl-Tku rataosalla rataa palautetusta sepelistä otetuille 75 näytteelle. (jatkuu seur. sivulla)

Seula (mm)	148+260	149+460	150+960	151+100	151+360	151+560	152+160	153+620	154+000	155+080	156+500	157+560	158+360	159+420	160+440
70	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
63	91	95	100.0	100	100	100	100.0	100	100	100	100	92	100	96	100
32	6.6	6.3	3.5	4.9	10.2	14.6	13.7	7.8	6.6	16.3	19.1	3.5	17.5	2.2	7.4
20	0.2	0.3	0.4	0.2	0.6	0.3	0.4	0.7	0.4	0.9	0.6	0.5	1.0	0.4	0.5
8	0.2	0.2	0.2	0.2	0.6	0.3	0.4	0.6	0.4	0.9	0.6	0.5	0.7	0.3	0.4
4	0.2	0.2	0.2	0.2	0.6	0.3	0.4	0.6	0.4	0.9	0.6	0.5	0.7	0.3	0.4
2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.6	0.3	0.4	0.6	0.4	0.9	0.6	0.5	0.7	0.3	0.4
1	0.2	0.2	0.2	0.2	0.5	0.3	0.4	0.6	0.4	0.9	0.6	0.5	0.7	0.3	0.4
0.5	0.1	0.2	0.2	0.2	0.5	0.3	0.4	0.5	0.4	0.8	0.5	0.4	0.6	0.2	0.4
0.25	0.1	0.2	0.1	0.2	0.3	0.2	0.3	0.4	0.3	0.5	0.4	0.3	0.4	0.2	0.2
0.125	0.1	0.1	0.1	0.1	0.2	0.1	0.2	0.2	0.2	0.3	0.2	0.2	0.3	0.1	0.1
0.063	0.0	0.1	0.0	0.0	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.0

Seula (mm)	161+080	162+340	163+680	164+160	165+060	166+980	168+020	168+720	169+340	170+340	171+020	172+100	173+540	173+540	174+580
70	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
63	100	100	100.0	97	82	100	94.2	97	100	100	95	100	100	100	97
32	6.8	10.3	12.1	12.8	26.0	10.4	26.3	9.1	30.2	8.5	13.1	19.2	45.2	38.4	4.7
20	0.3	0.9	0.7	0.3	1.8	0.6	0.7	0.2	1.0	0.3	0.7	0.3	3.5	1.5	0.5
8	0.3	0.5	0.7	0.3	1.7	0.6	0.5	0.2	0.5	0.3	0.3	0.2	0.9	0.7	0.5
4	0.3	0.5	0.7	0.2	1.6	0.6	0.5	0.2	0.5	0.3	0.3	0.2	0.9	0.7	0.5
2	0.3	0.5	0.6	0.2	1.6	0.6	0.5	0.2	0.5	0.3	0.2	0.2	0.9	0.7	0.4
1	0.3	0.5	0.6	0.2	1.5	0.5	0.4	0.2	0.5	0.3	0.2	0.2	0.8	0.7	0.4
0.5	0.3	0.4	0.5	0.2	1.4	0.3	0.4	0.2	0.5	0.3	0.2	0.2	0.8	0.6	0.4
0.25	0.2	0.3	0.3	0.2	1.0	0.2	0.3	0.2	0.4	0.2	0.2	0.2	0.5	0.4	0.3
0.125	0.1	0.1	0.2	0.1	0.5	0.1	0.2	0.1	0.2	0.1	0.1	0.1	0.3	0.2	0.2
0.063	0.1	0.1	0.1	0.0	0.3	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.0	0.2	0.1	0.1

Seula (mm)	175+000	176+160	177+060	177+080	178+660	179+640	179+660	180+900	181+560	182+000	183+040	184+520	184+540	185+740	186+440
70	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
63	100	100	100.0	100	100	100	100.0	100	100	100	100	100	100	100	100
32	19.9	12.4	46.9	43.9	17.2	11.4	54.6	18.8	4.0	3.5	8.9	20.7	29.2	19.9	19.5
20	0.8	1.0	3.5	3.2	0.8	1.2	0.7	0.9	0.3	0.3	1.1	1.8	1.5	1.2	2.1
8	0.5	0.7	1.8	1.6	0.7	1.0	0.7	0.6	0.3	0.3	0.8	0.8	0.9	0.7	1.2
4	0.5	0.7	1.8	1.6	0.7	1.0	0.6	0.6	0.3	0.3	0.7	0.8	0.8	0.6	1.2
2	0.5	0.6	1.8	1.6	0.7	1.0	0.6	0.6	0.3	0.3	0.7	0.8	0.8	0.6	1.1
1	0.4	0.6	1.7	1.5	0.7	1.0	0.6	0.6	0.3	0.3	0.6	0.8	0.8	0.6	1.1
0.5	0.4	0.5	1.3	1.1	0.6	0.7	0.5	0.5	0.3	0.3	0.4	0.7	0.7	0.4	0.9
0.25	0.3	0.3	0.7	0.4	0.4	0.4	0.2	0.3	0.2	0.2	0.2	0.4	0.5	0.3	0.6
0.125	0.2	0.1	0.2	0.1	0.2	0.2	0.1	0.2	0.1	0.1	0.1	0.2	0.2	0.1	0.3
0.063	0.1	0.1	0.1	0.0	0.1	0.1	0.0	0.1	0.1	0.0	0.0	0.1	0.1	0.0	0.2

Taulukko A.3 jatkoa...

Seula (mm)	186+460	187+960	188+060	189+980	190+700	191+340	191+360	192+380	193+160	256+300	257+300	258+740	258+780	259+300	259+320
70	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
63	96	100	94.0	89	100	100	100.0	100	82	94	100	100	100	100	100
32	23.4	7.1	18.2	2.6	3.0	25.4	19.4	4.8	3.9	4.4	1.2	28.4	22.9	40.5	51.0
20	2.0	1.0	0.8	0.8	1.0	2.3	1.9	1.1	1.0	1.0	0.6	1.4	1.1	4.9	7.5
8	1.1	0.9	0.7	0.8	1.0	1.0	1.2	1.1	0.9	1.0	0.6	0.7	0.8	1.3	1.3
4	1.1	0.9	0.7	0.8	0.9	1.0	1.1	1.1	0.9	0.9	0.6	0.7	0.8	1.2	1.2
2	1.1	0.9	0.7	0.7	0.9	1.0	1.1	1.0	0.9	0.9	0.6	0.7	0.7	1.1	1.2
1	1.1	0.9	0.6	0.7	0.8	0.9	1.1	1.0	0.9	0.9	0.6	0.7	0.4	1.1	1.2
0.5	0.9	0.7	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	0.8	0.8	0.7	0.5	0.6	0.2	1.0	1.1
0.25	0.6	0.3	0.3	0.5	0.6	0.6	0.7	0.6	0.6	0.6	0.4	0.5	0.1	0.7	0.8
0.125	0.4	0.1	0.1	0.3	0.4	0.3	0.5	0.3	0.3	0.4	0.2	0.3	0.0	0.4	0.5
0.063	0.2	0.0	0.0	0.2	0.2	0.2	0.3	0.2	0.2	0.2	0.1	0.2	0.0	0.2	0.2

Seula (mm)	260+660	261+540	262+220	263+020	264+660	265+300	266+680	266+700	267+400	268+400	269+860	270+100	271+090	272+900	273+120
70	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
63	93	94	94.4	100	100	100	91.8	100	100	100	100	94	100	100	89
32	9.5	10.6	8.1	2.4	16.9	3.0	18.8	16.8	6.9	8.6	21.9	3.8	8.5	11.7	6.3
20	0.6	0.8	1.1	1.1	1.7	1.3	1.0	1.3	0.5	0.9	0.4	0.5	0.7	1.0	0.7
8	0.6	0.8	0.8	1.1	0.8	1.3	0.3	0.8	0.5	0.8	0.3	0.5	0.7	0.9	0.5
4	0.6	0.8	0.8	1.0	0.8	1.3	0.3	0.8	0.5	0.8	0.3	0.5	0.7	0.9	0.5
2	0.6	0.7	0.8	1.0	0.8	1.2	0.3	0.7	0.5	0.8	0.3	0.5	0.7	0.9	0.5
1	0.6	0.7	0.8	0.9	0.8	1.2	0.3	0.7	0.4	0.8	0.3	0.5	0.6	0.8	0.5
0.5	0.6	0.7	0.7	0.8	0.6	1.0	0.3	0.6	0.4	0.7	0.3	0.4	0.5	0.7	0.4
0.25	0.4	0.5	0.4	0.6	0.4	0.7	0.3	0.4	0.3	0.5	0.3	0.3	0.4	0.5	0.3
0.125	0.3	0.3	0.3	0.4	0.2	0.4	0.2	0.3	0.2	0.3	0.2	0.2	0.2	0.3	0.2
0.063	0.1	0.2	0.1	0.2	0.1	0.2	0.1	0.1	0.1	0.2	0.1	0.1	0.1	0.2	0.1

Taulukko A.4. Yhteenveto Geopalvelu Oy:n tekemistä kuivaseulonnoista TjL-Tku rataosan hylkysepelistä otetuille 66 näytteelle. (jatkuu seur. sivulla)

Seula (mm)	148+260	149+460	150+960	151+100	151+360	151+560	152+160	153+620	154+000	155+080	156+500	157+560	158+360	159+420	160+440
63	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
32	100	79	100.0	100	100	100	100.0	90	90	100	100	91	98	100	100
16	93.1	24.6	38.5	76.5	73.4	98.5	74.7	20.0	60.2	77.6	88.4	6.8	74.5	46.3	73.9
8	82.0	16.2	19.5	67.6	48.0	93.0	58.7	14.2	52.9	68.1	78.9	2.7	54.3	38.3	65.9
4	73.0	12.1	13.3	61.1	34.3	86.0	49.1	11.9	48.9	58.1	66.4	2.4	42.9	34.7	60.7
2	62.8	9.2	10.1	53.0	25.2	74.1	39.8	9.6	43.3	45.2	52.4	2.3	31.3	28.5	52.0
1	52.4	7.2	8.3	43.4	19.7	60.3	31.1	7.6	34.5	30.6	39.6	2.3	21.7	20.1	39.0
0.5	38.1	5.2	6.3	27.9	14.6	43.7	20.6	5.2	21.2	16.7	25.4	2.0	14.0	11.0	21.8
0.25	26.0	3.8	4.8	15.1	11.3	31.4	14.0	3.2	11.9	10.2	15.9	1.7	10.0	6.7	12.1
0.125	18.1	2.8	3.5	7.6	8.1	22.0	9.6	2.0	6.8	6.9	9.5	1.2	7.1	4.4	7.3
0.063	12.4	2.0	2.3	5.1	5.7	16.3	7.1	1.4	4.4	4.8	6.2	0.8	4.9	3.1	5.1

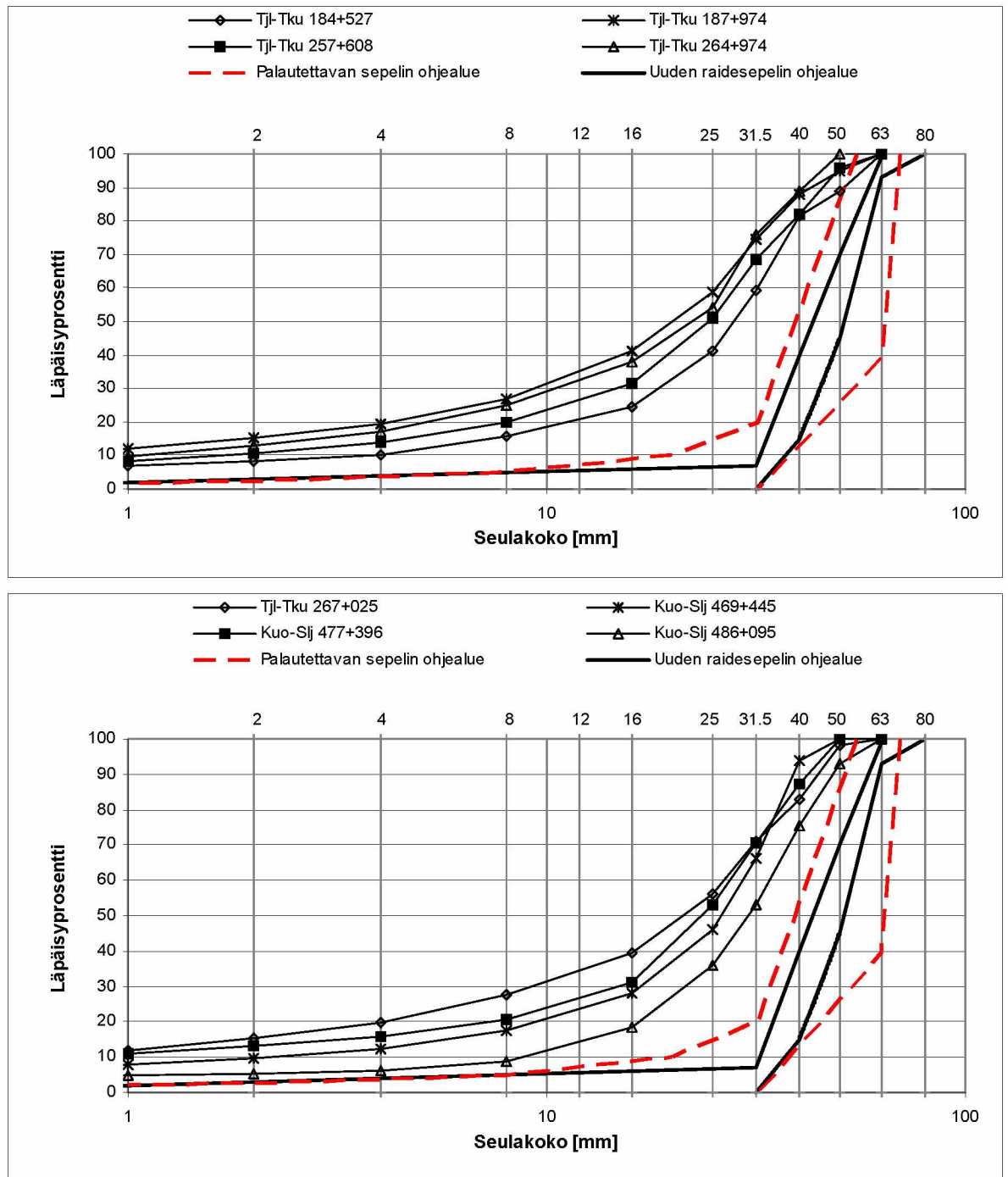
Seula (mm)	161+080	162+340	163+680	164+160	165+060	166+980	168+020	168+720	171+040	172+100	173+560	174+580	175+000	176+180	177+060
63	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
32	83	97	100.0	100	100	100	94.0	100	100	100	90	95	100	100	95
16	32.1	56.7	67.8	89.5	80.3	37.3	45.1	64.6	70.8	96.4	39.4	54.7	73.1	41.2	65.6
8	27.7	42.6	49.7	71.8	62.9	25.7	39.0	51.4	56.4	90.6	30.5	41.7	57.6	26.3	53.3
4	24.9	36.8	39.6	61.3	52.4	21.4	34.4	43.0	47.2	83.9	25.7	34.9	49.6	22.7	46.5
2	21.8	30.0	30.5	48.5	40.7	16.9	29.2	34.5	38.8	76.2	20.9	26.8	42.1	19.3	38.8
1	17.9	23.3	21.7	34.9	30.2	12.8	22.7	26.0	30.4	67.2	15.5	17.3	33.7	16.2	32.2
0.5	11.7	13.6	13.1	20.7	19.5	8.4	13.5	15.8	19.5	48.7	8.8	8.2	21.8	11.3	24.4
0.25	6.7	6.8	8.8	13.5	11.4	5.4	8.1	8.5	9.6	24.6	5.4	4.5	11.9	6.9	18.2
0.125	3.9	3.8	6.2	9.4	7.0	3.4	5.4	3.4	3.4	13.7	3.7	3.1	4.8	4.1	12.7
0.063	2.5	2.6	4.5	6.6	5.3	2.3	4.1	0.2	0.1	8.4	2.7	2.2	0.3	2.6	8.7

Seula (mm)	178+660	179+660	180+900	181+560	182+000	183+040	184+540	185+760	186+460	187+940	188+060	189+980	190+700	191+340	192+380
63	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
32	100	100	100.0	100	98	100	100.0	100	100	100	100	100	100	100	94
16	44.7	80.3	47.7	48.5	62.1	63.2	59.7	58.4	88.9	67.6	59.0	62.0	93.3	42.3	62.9
8	32.5	58.2	25.0	27.9	36.4	47.4	39.3	43.1	78.4	59.2	39.2	51.6	88.1	26.0	49.3
4	26.1	46.0	16.3	20.6	23.3	37.1	29.3	33.8	70.4	52.5	30.1	45.9	79.0	19.9	41.0
2	19.3	34.5	9.4	15.0	15.2	25.2	22.6	24.9	60.0	44.5	20.9	40.8	63.5	13.3	33.1
1	13.6	24.5	6.3	11.3	11.7	18.1	18.0	18.4	46.4	34.2	14.7	35.6	46.8	10.0	25.0
0.5	8.8	16.4	5.0	8.4	9.0	13.7	13.5	14.1	27.6	20.2	11.1	25.9	28.9	8.0	16.0
0.25	6.3	11.2	4.2	6.7	7.3	10.6	10.3	11.1	16.5	11.6	8.2	17.8	17.7	6.4	10.5
0.125	4.3	7.3	3.3	5.2	5.8	7.9	7.4	8.3	10.4	6.8	5.3	12.4	11.6	4.8	7.1
0.063	2.9	5.0	2.7	4.1	4.6	5.8	5.1	5.8	7.0	4.5	3.0	8.8	7.9	3.5	5.0

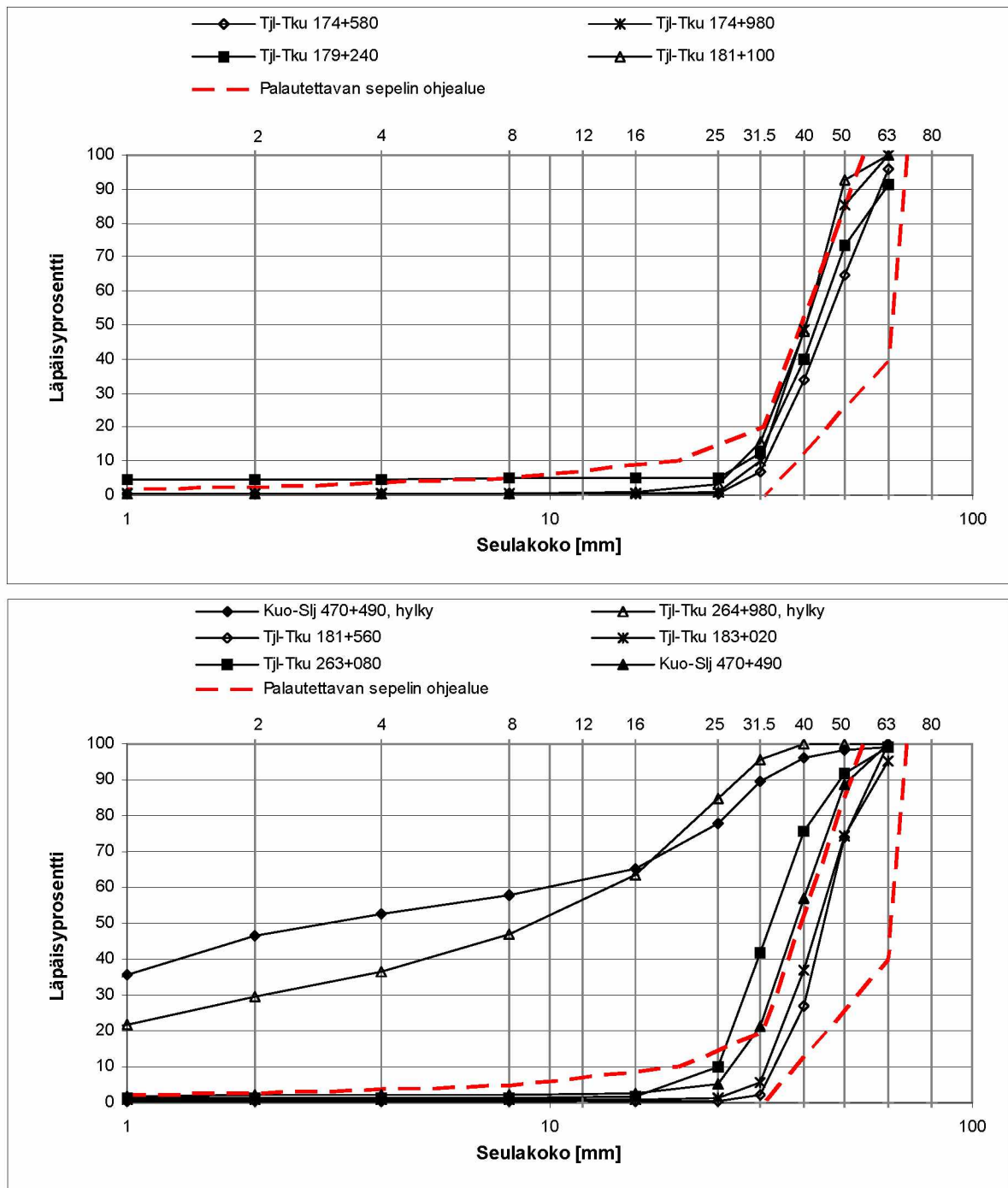
Taulukko A.4 jatkoa..

Seula (mm)	193+160	256+300	257+300	258+740	259+300	260+660	261+520	262+200	263+020	264+660	265+300	266+700	267+400	268+400	269+860
63	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
32	100	100	100.0	100	100	88	100.0	100	100	100	100	100	100	86	100
16	47.5	79.7	42.4	61.2	79.3	24.2	62.6	81.9	72.8	69.5	60.8	85.1	70.3	35.3	55.9
8	30.1	57.6	34.6	35.9	60.9	14.5	38.8	42.2	40.4	53.4	48.2	72.8	63.6	22.7	38.6
4	24.4	48.6	28.7	28.2	50.7	11.3	28.6	28.8	23.9	40.6	41.8	65.1	58.4	18.4	29.7
2	17.9	40.3	23.3	21.5	40.9	9.7	21.3	17.7	14.3	28.1	34.8	57.2	49.7	14.8	22.9
1	12.6	31.9	18.5	16.8	32.8	8.4	16.8	12.9	11.5	20.8	27.1	48.4	37.3	11.8	17.8
0.5	9.2	20.9	13.5	12.8	25.0	6.4	13.3	9.8	9.4	15.9	18.4	38.0	21.8	9.4	13.7
0.25	7.1	13.9	10.1	9.8	19.5	4.6	10.8	7.7	7.5	12.4	12.5	28.8	13.2	7.5	10.7
0.125	5.3	9.7	7.4	7.1	14.4	3.1	8.2	5.7	5.7	9.2	7.8	17.7	8.5	5.6	7.8
0.063	3.6	6.8	5.3	4.8	10.1	2.0	5.5	3.8	3.8	6.2	5.0	9.9	6.0	3.9	5.5

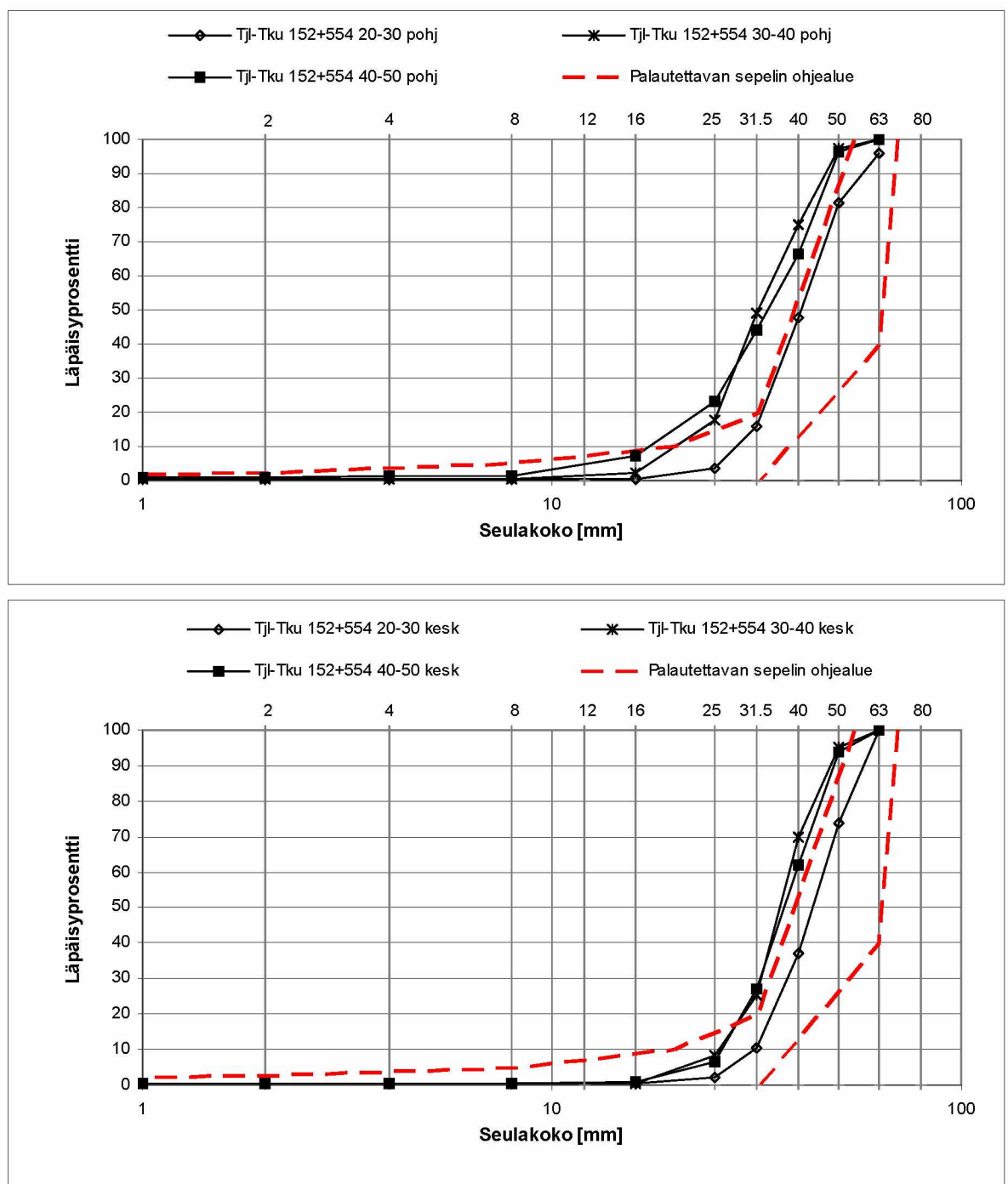
Seula (mm)	270+140	271+090	272+900	273+120	169+340	170+340
63	100	100	100	100	100	100
32	100	100	100.0	100	90	100
16	54.6	83.9	88.0	91.9	19.2	56.8
8	42.3	28.2	68.0	81.8	12.2	42.4
4	35.9	14.9	55.7	73.5	9.3	35.7
2	29.5	11.5	43.5	62.8	7.4	29.4
1	23.6	10.0	33.0	52.0	6.1	24.5
0.5	17.5	8.4	22.2	38.3	4.9	19.4
0.25	12.7	6.6	15.4	27.6	3.9	15.1
0.125	8.7	4.8	10.6	20.0	3.0	11.1
0.063	5.8	3.3	7.4	14.6	2.2	8.0



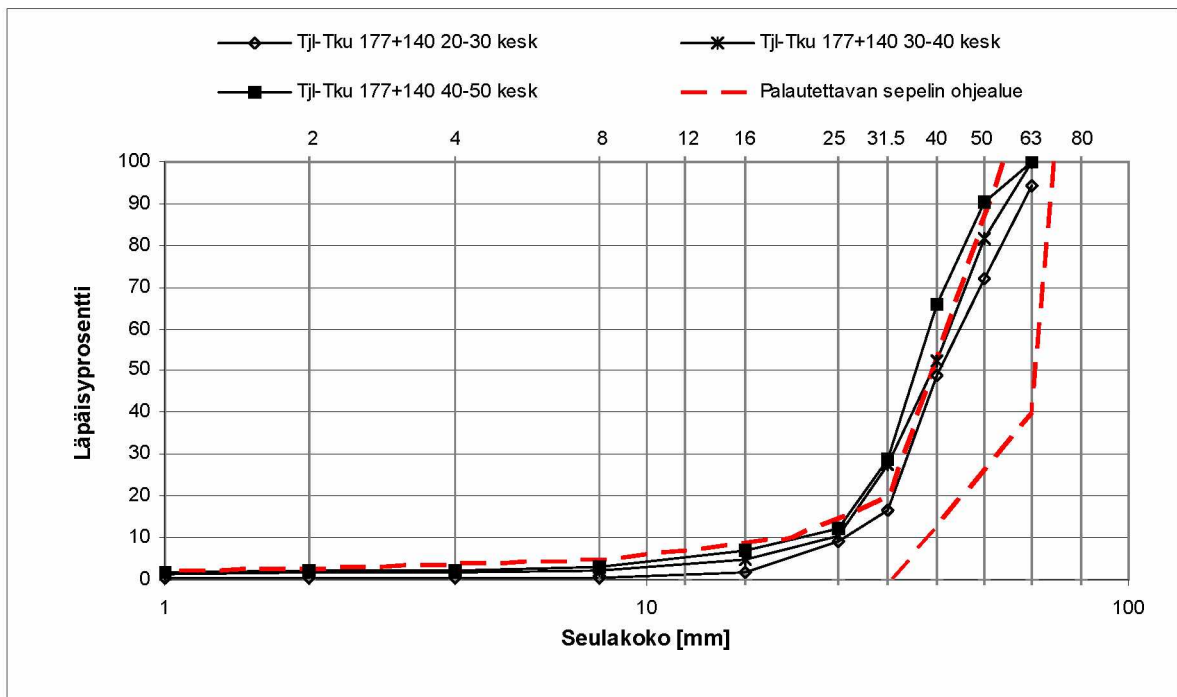
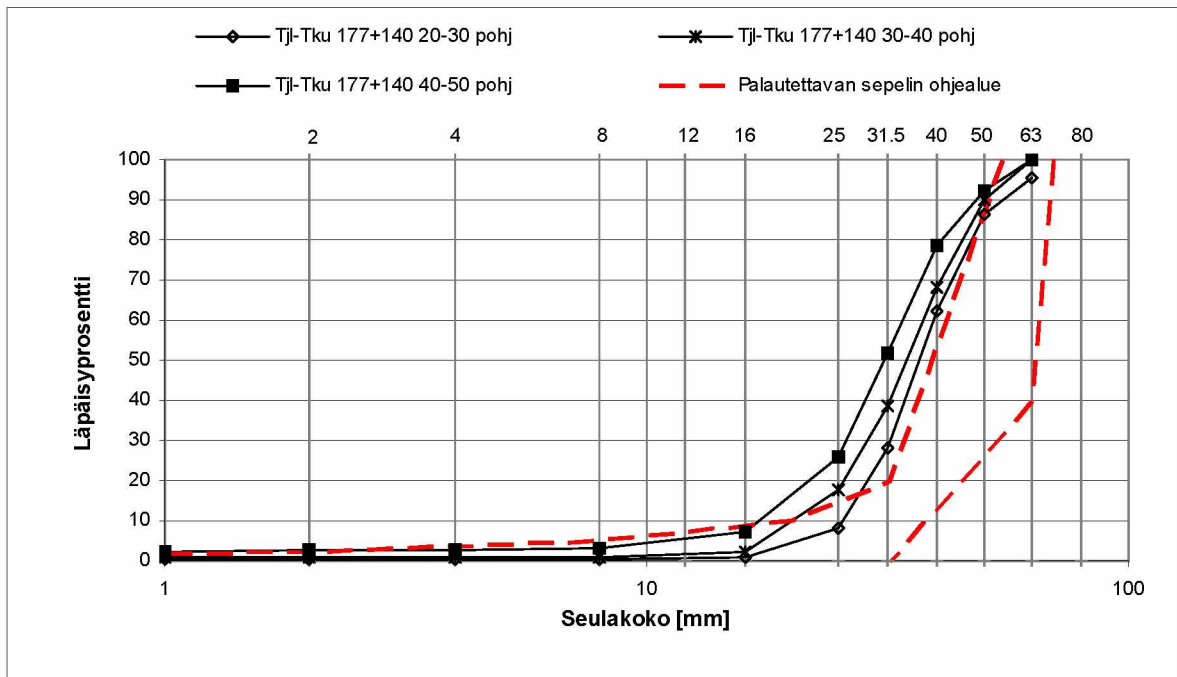
Kuva A.1. Ennen sepelinpuhdistusta otettujen tukikerrosnäytteiden rakeisuuskäyrät.



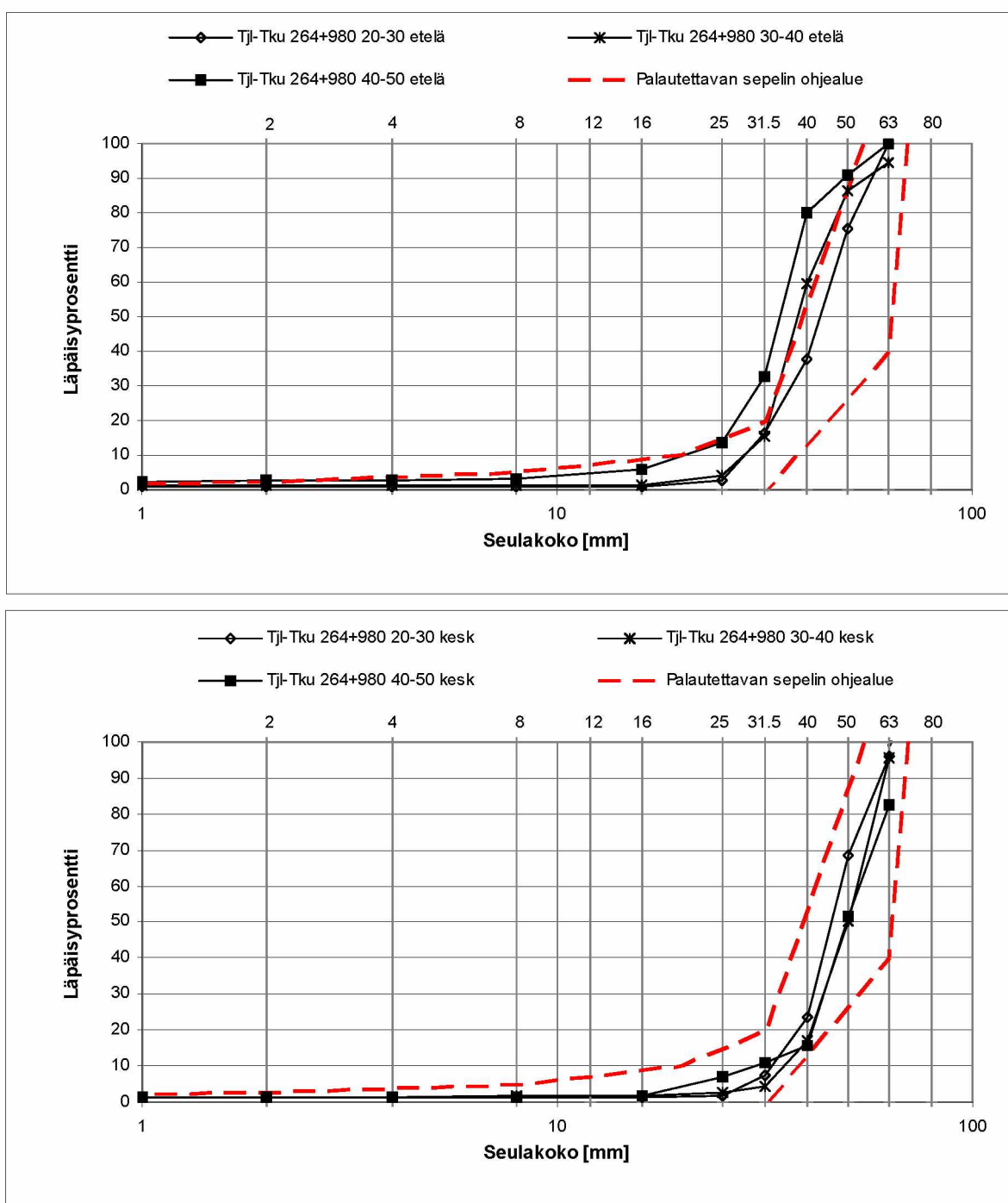
Kuva A.2. Rataan palautettujen ja hylkysepinäytteiden rakeisuuskäyrät.



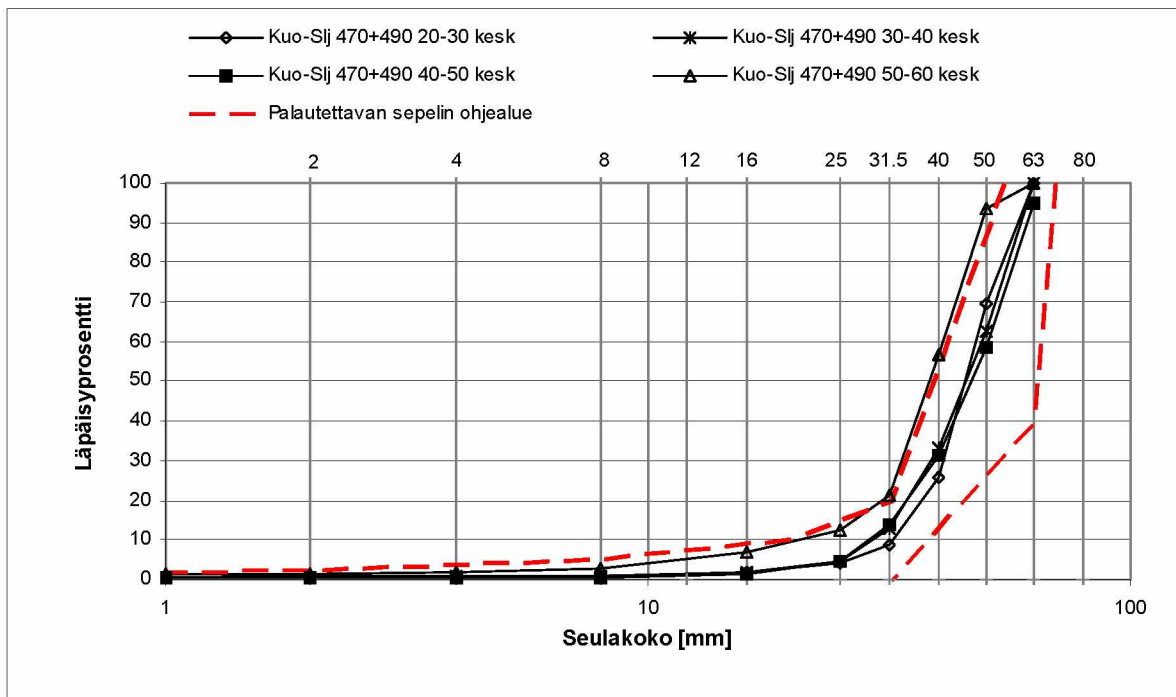
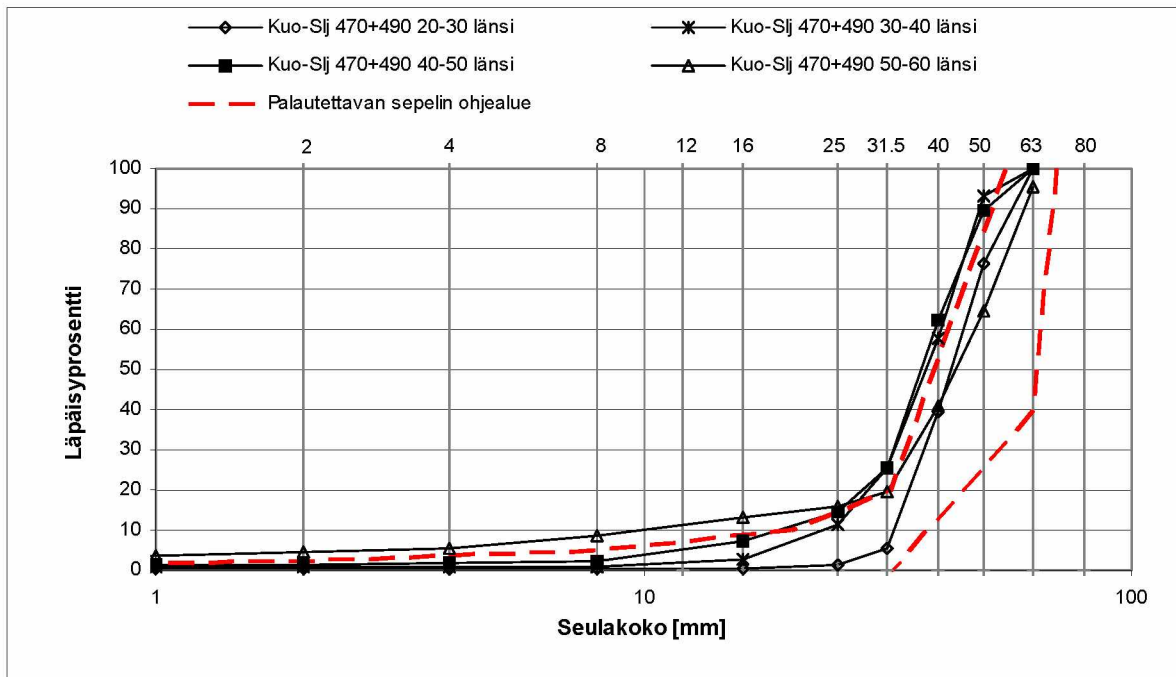
Kuva A.3/1. Sepelinpuhdistuksen jälkeen otettujen tukikerrosnäytteiden rakeisuuskäyrät.



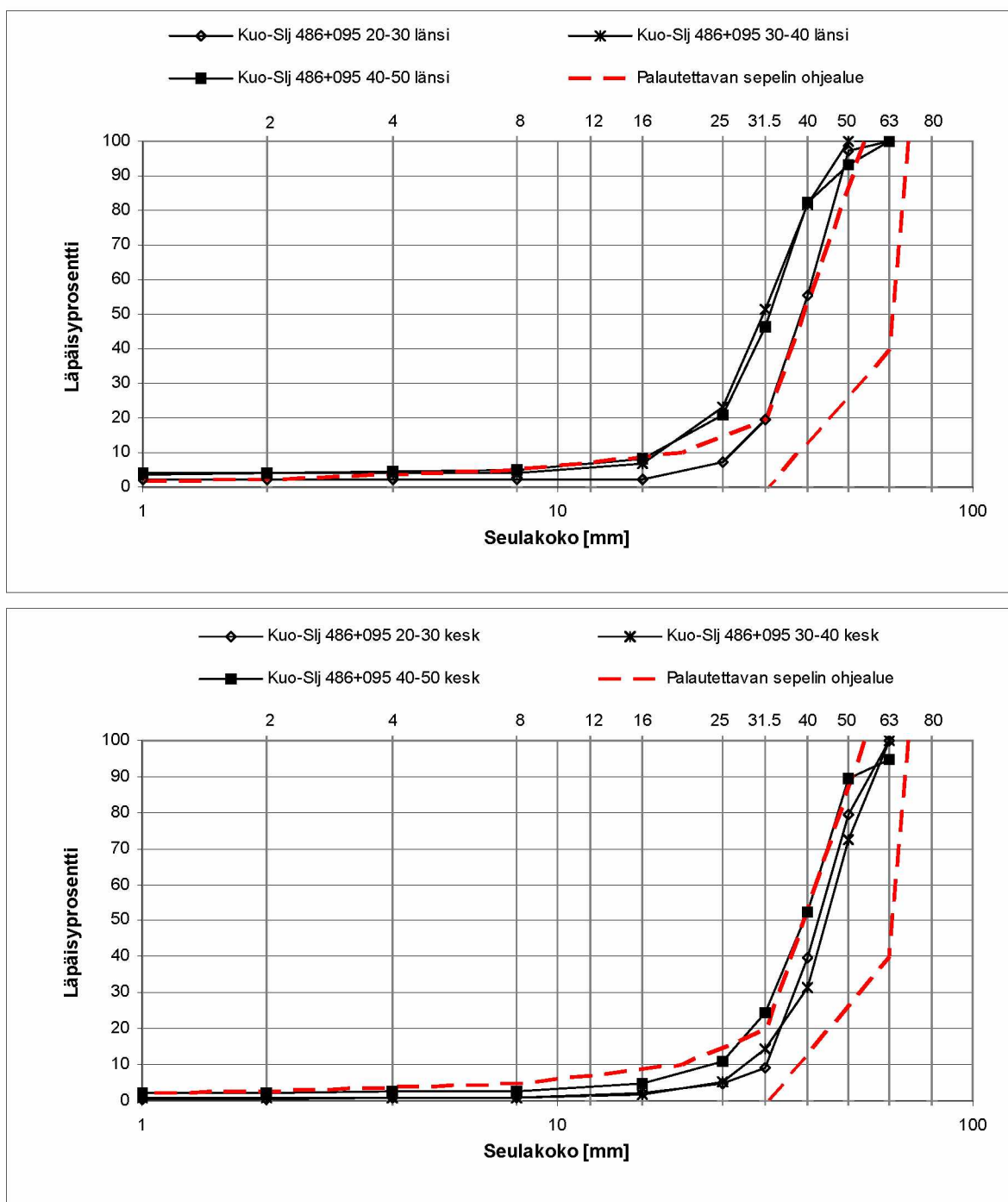
Kuva A.3/2. Sepelinpuhdistuksen jälkeen otettujen tukikerrosnäytteiden rakeisuuskäyrät.



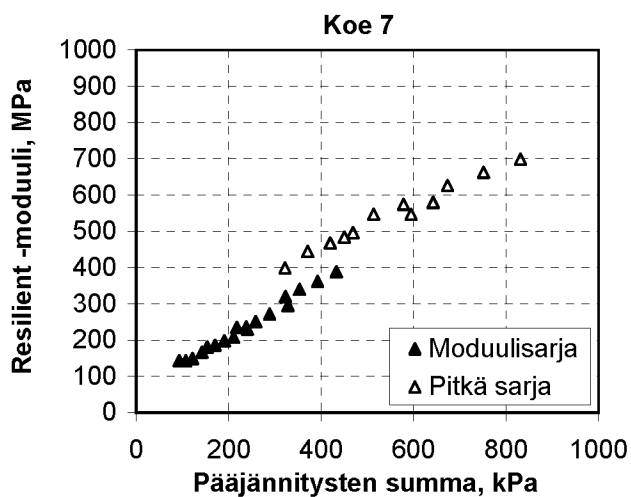
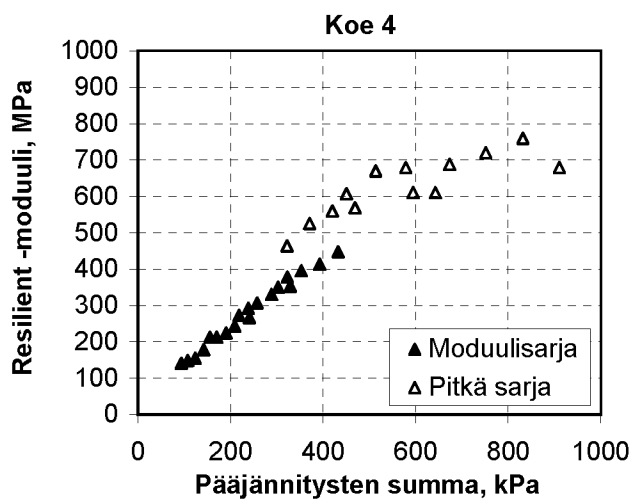
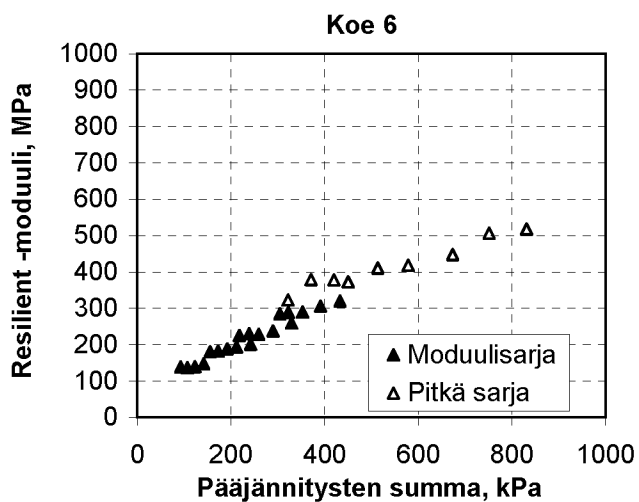
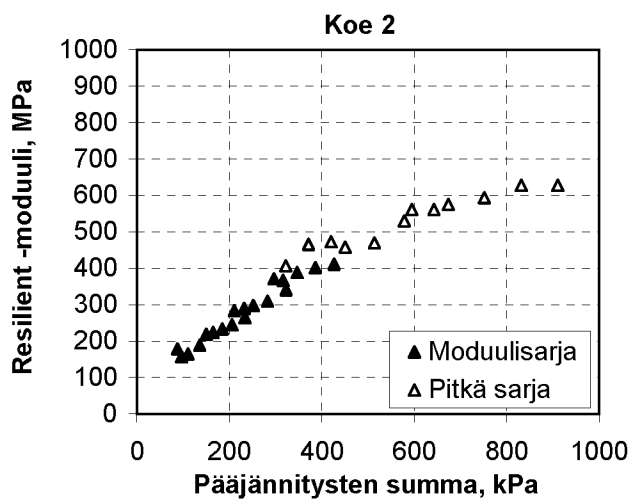
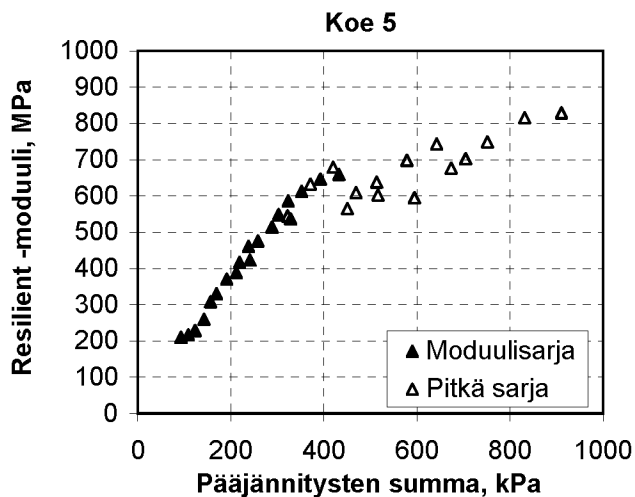
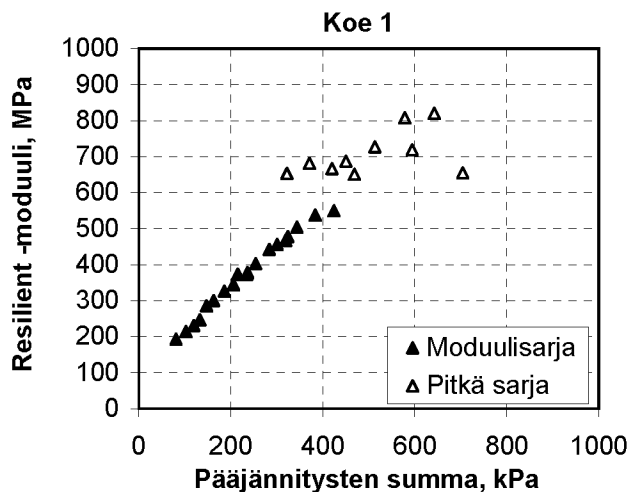
Kuva A.3/3. Sepelinpuhdistuksen jälkeen otettujen tukikerrosnäytteiden rakeisuuskäyrät.

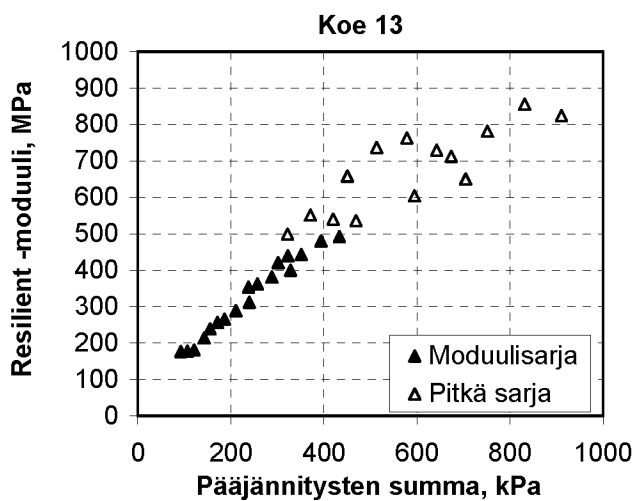
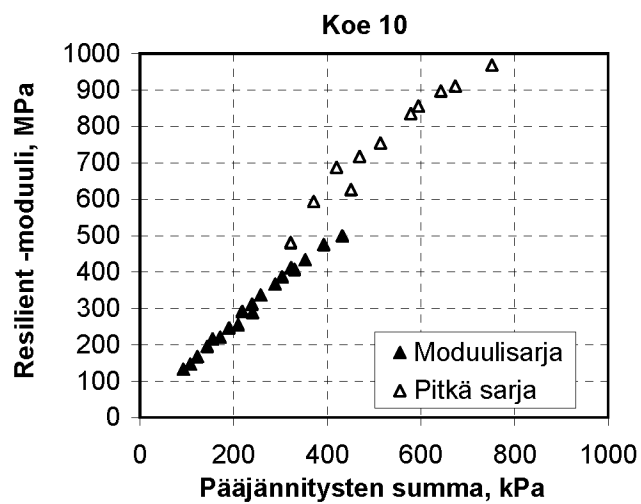
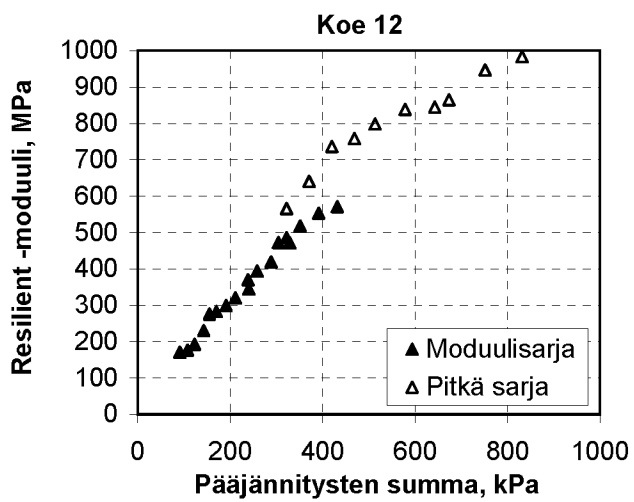
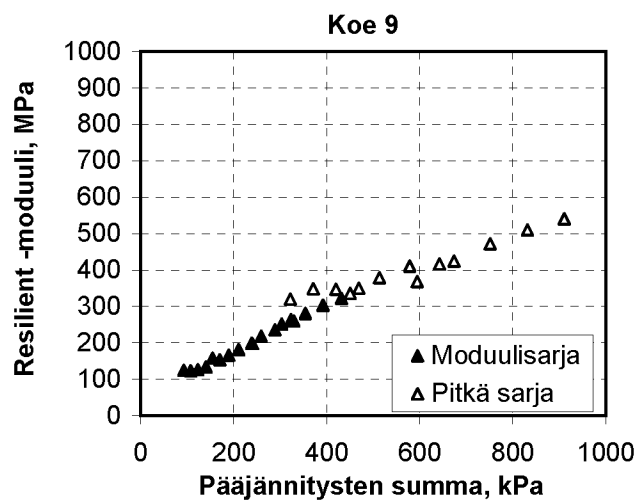
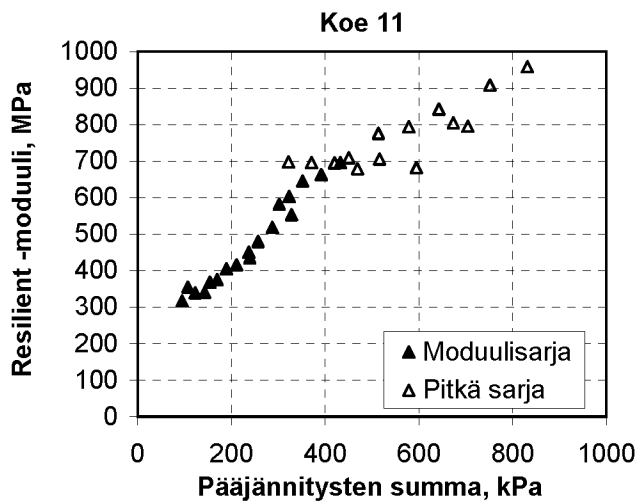
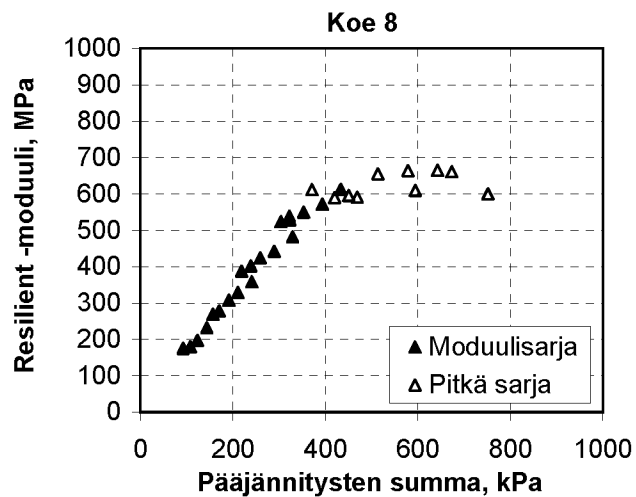


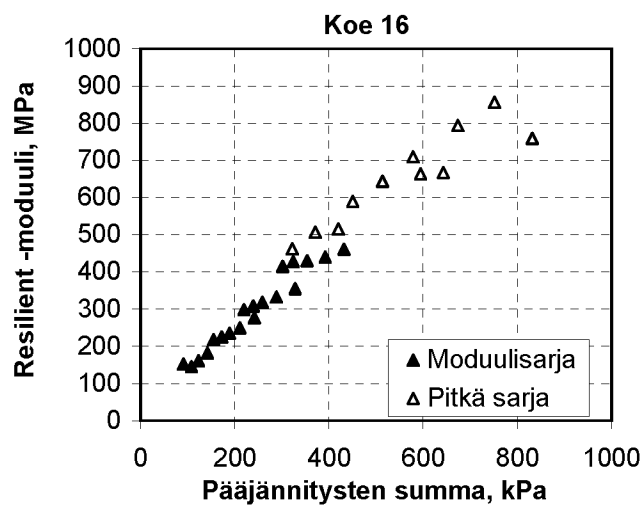
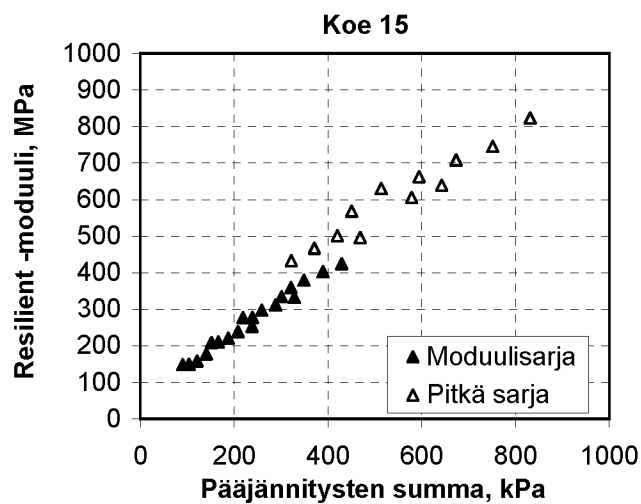
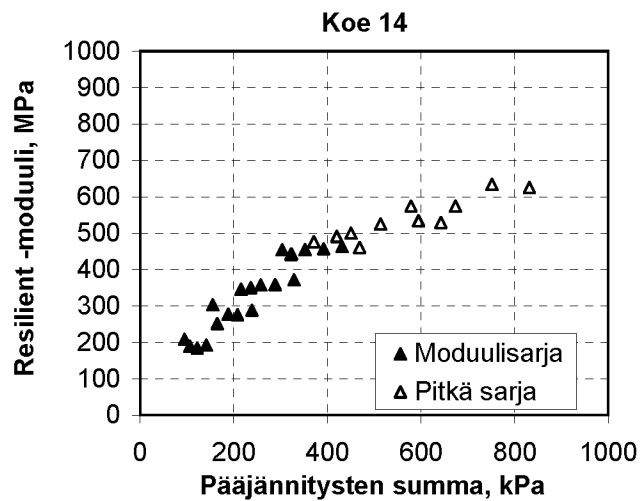
Kuva A.3/4. Sepelinpuhdistuksen jälkeen otettujen tukikerrosnäytteiden rakeisuuskäyrät.

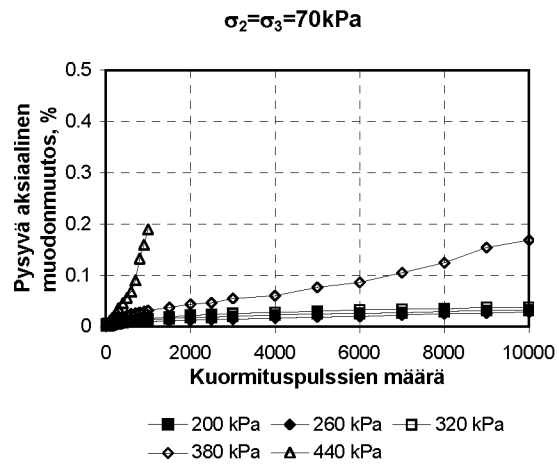
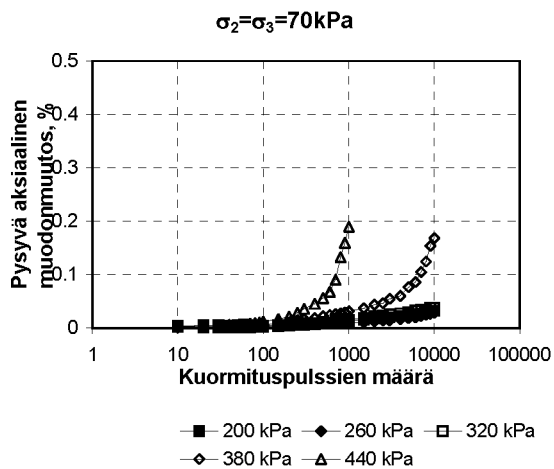
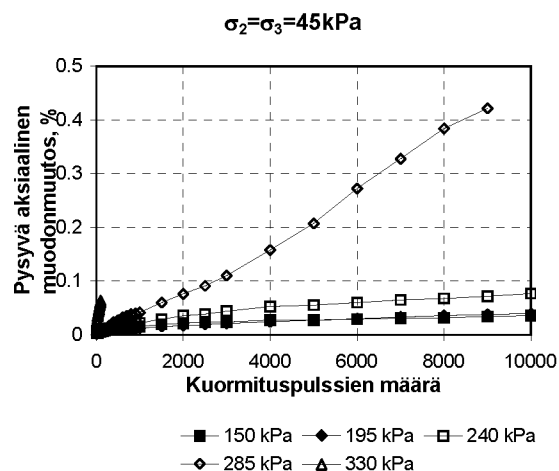
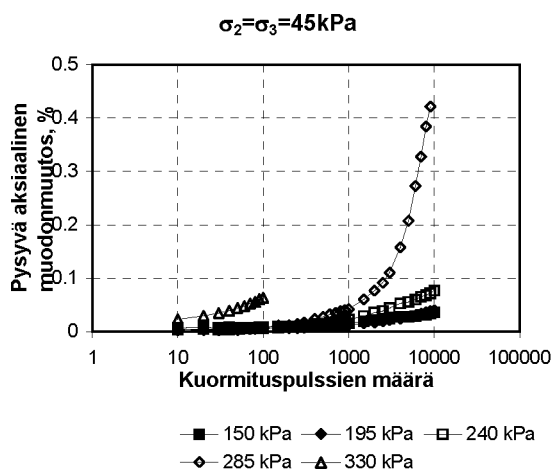


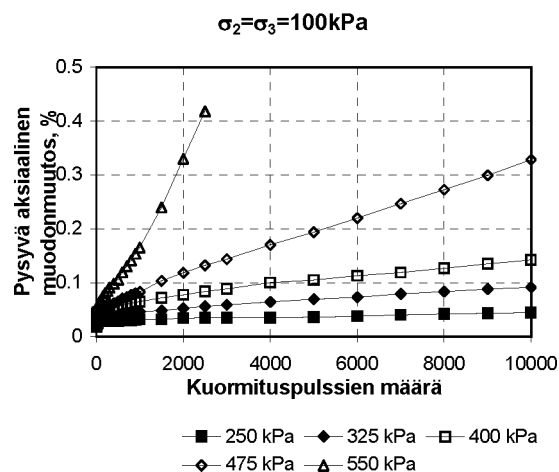
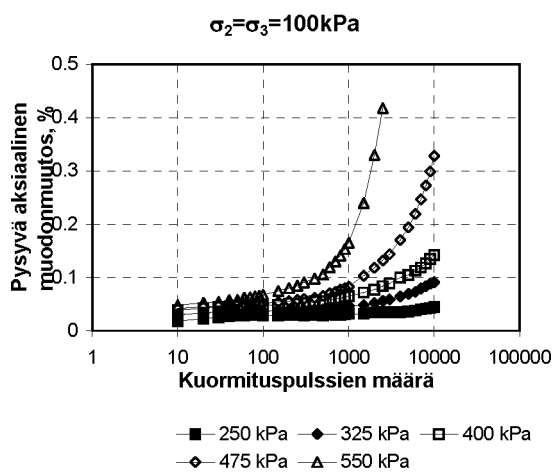
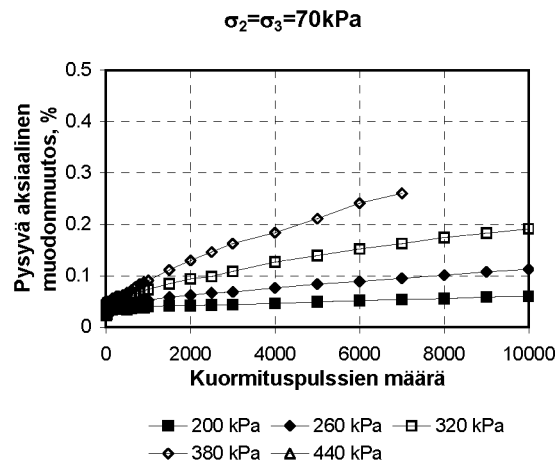
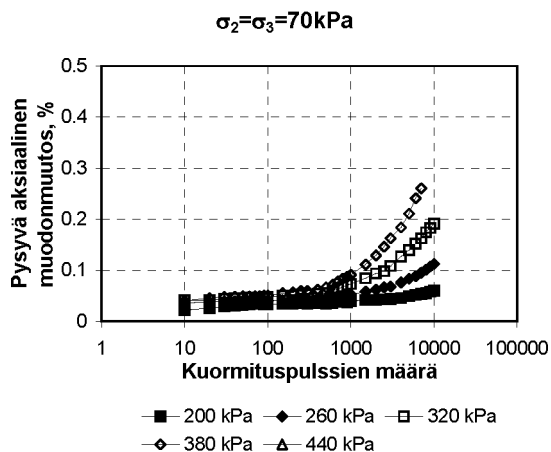
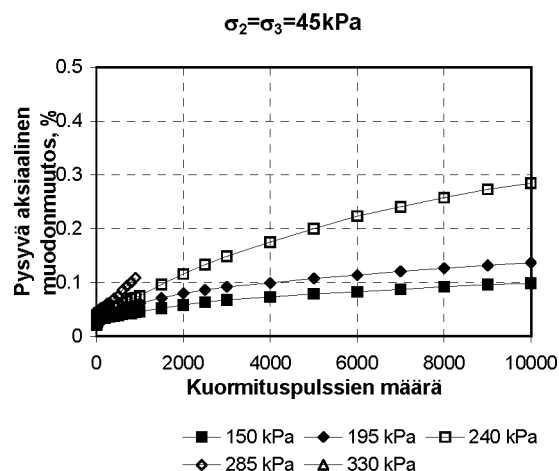
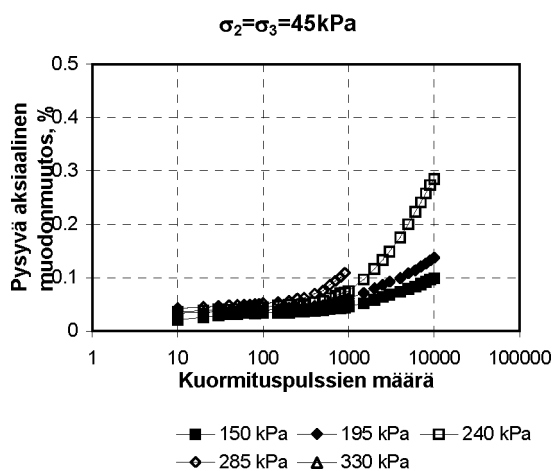
Kuva A.3/5. Sepelinpuhdistuksen jälkeen otettujen tukikerrosnäytteiden rakeisuuskäyrät.

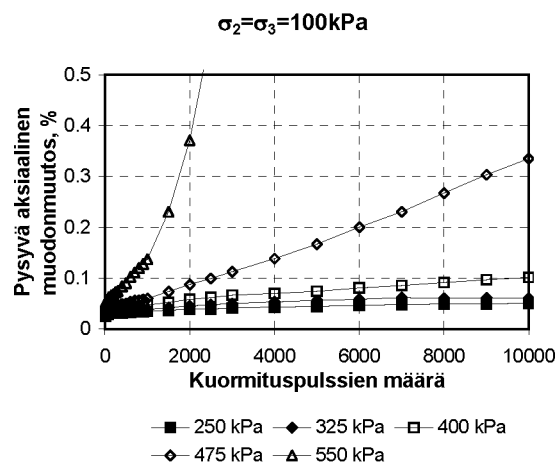
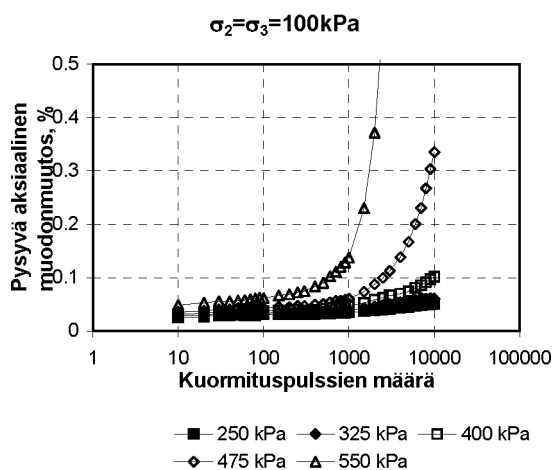
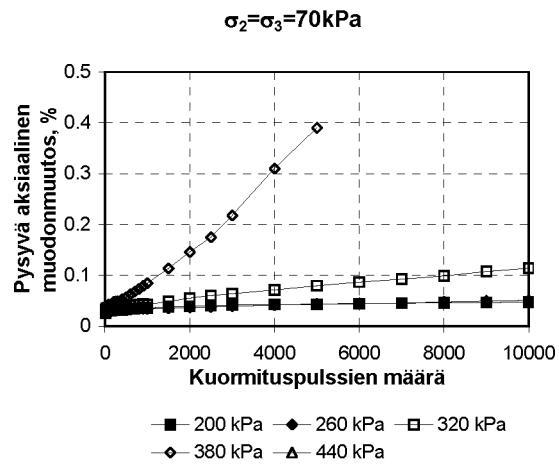
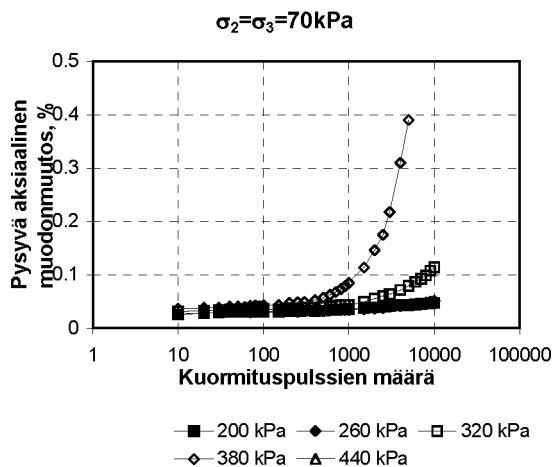
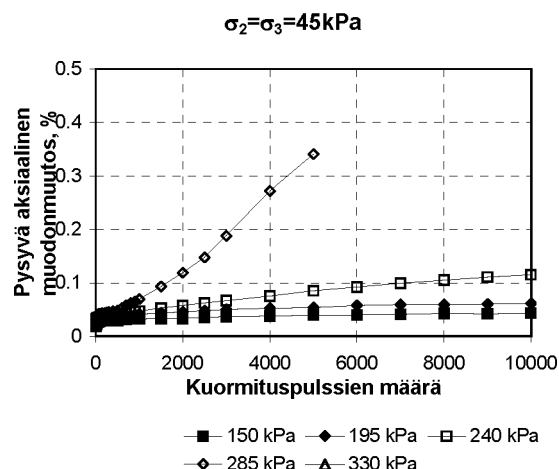
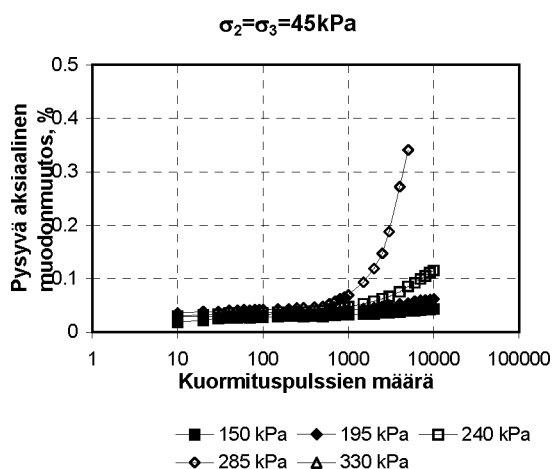


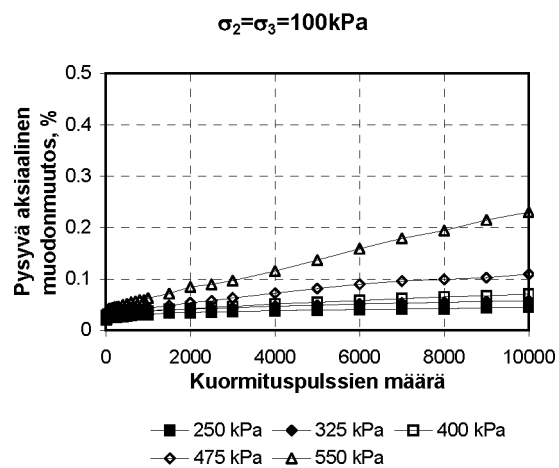
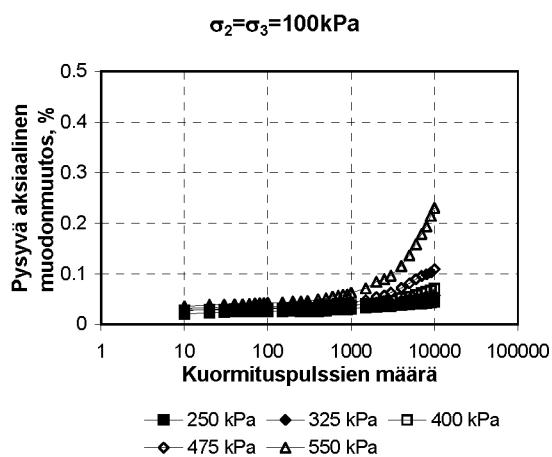
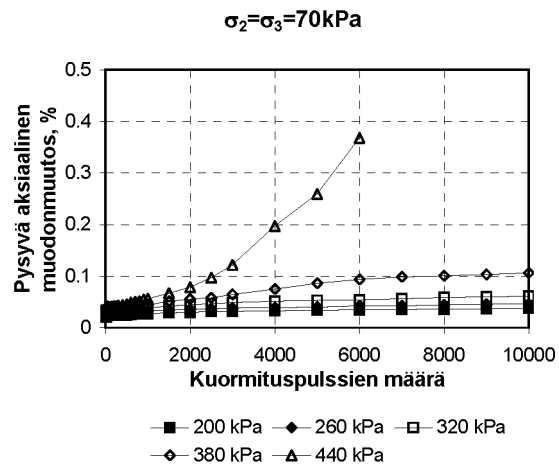
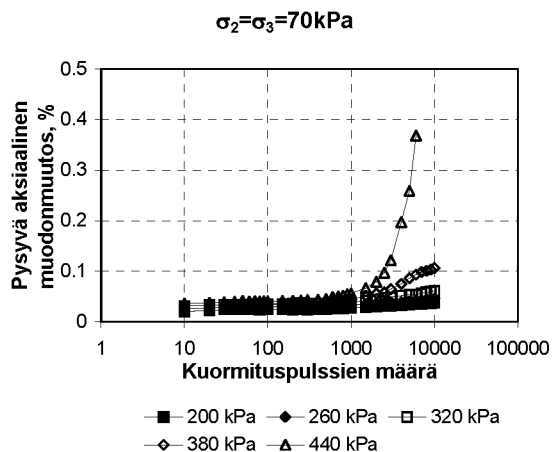
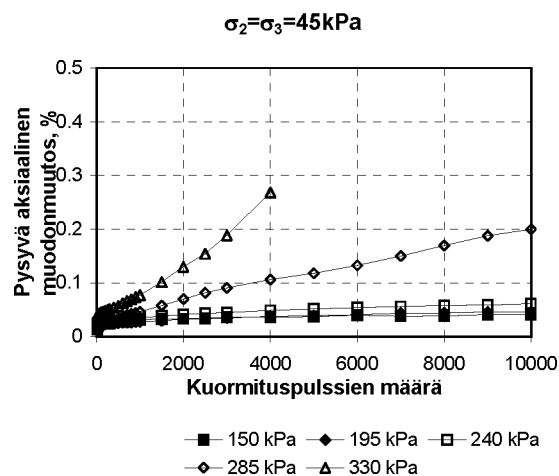
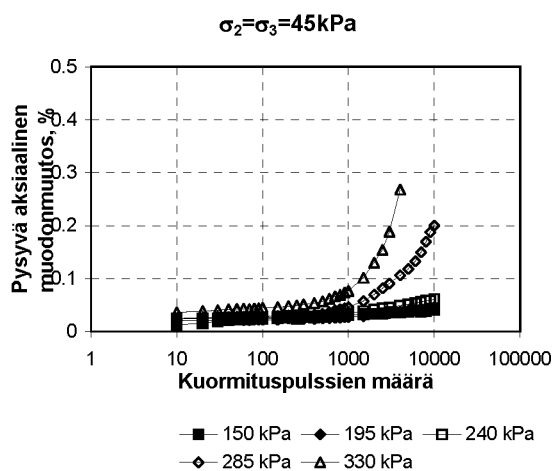


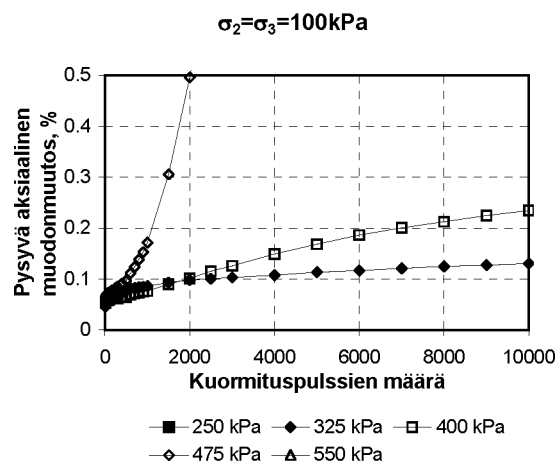
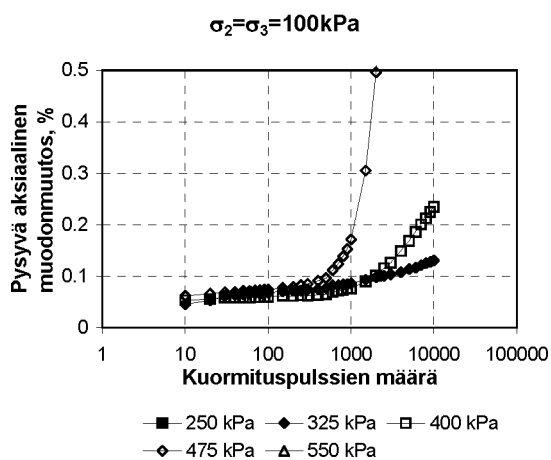
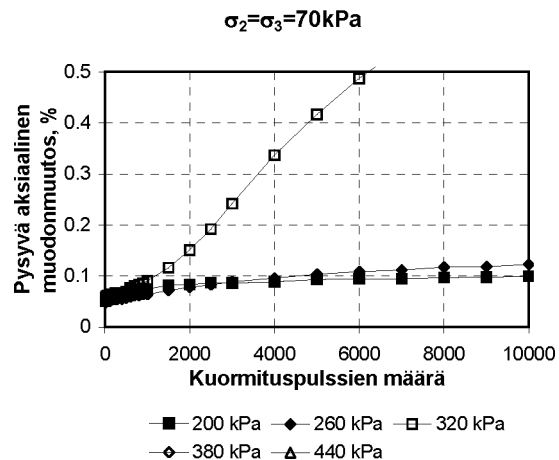
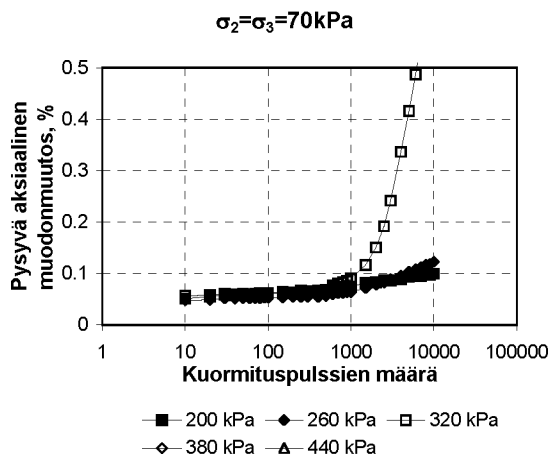
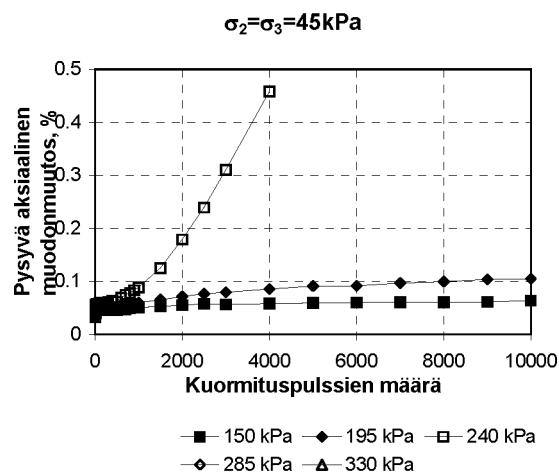
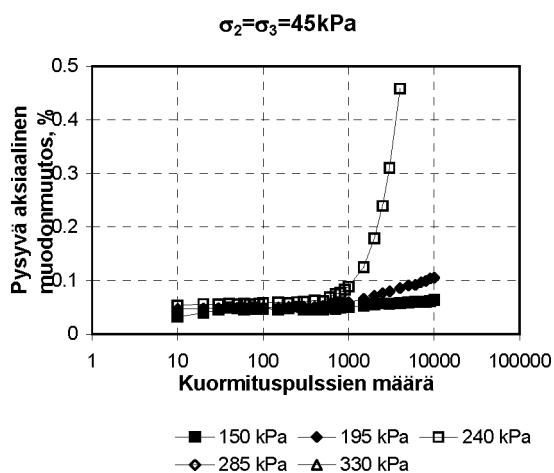


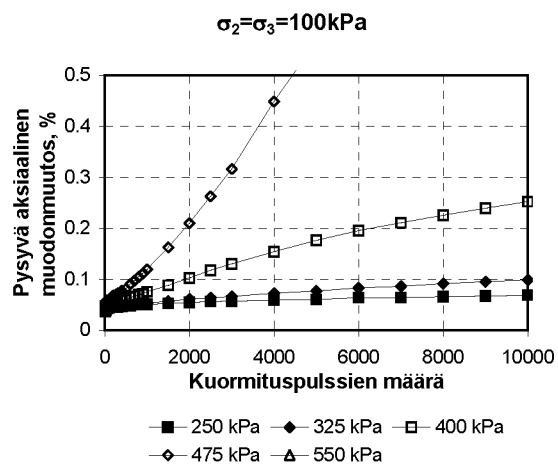
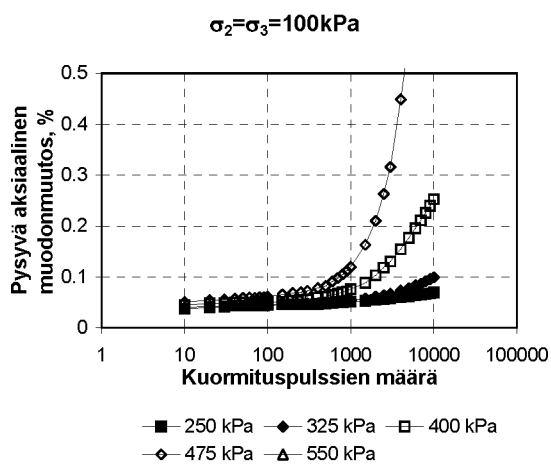
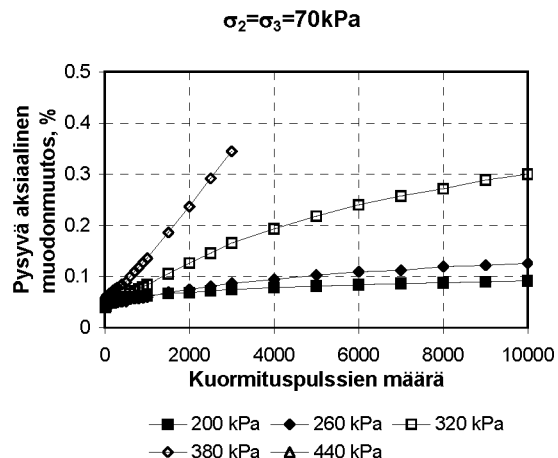
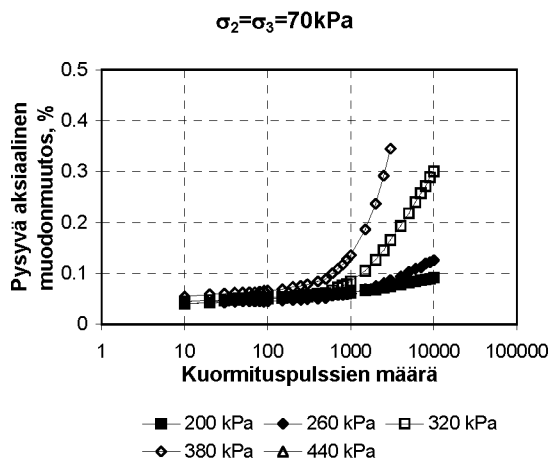
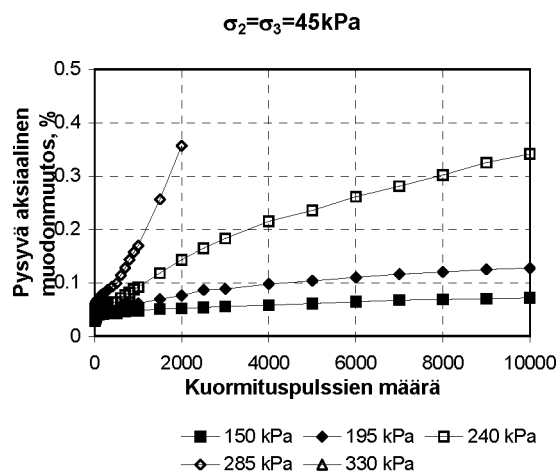
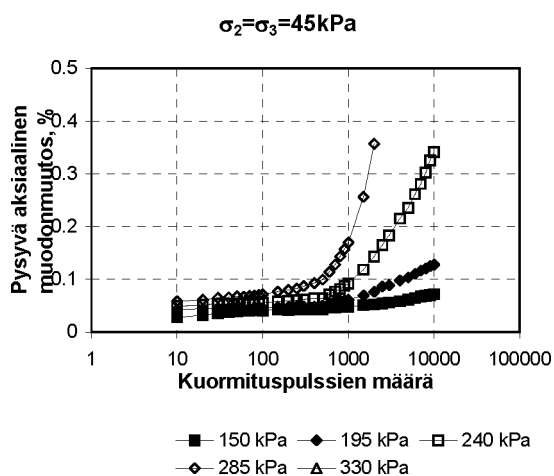


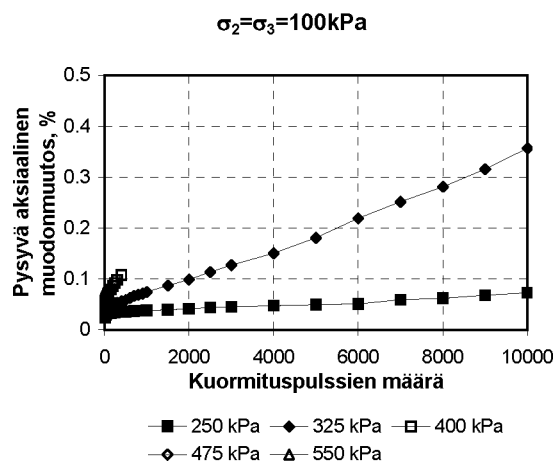
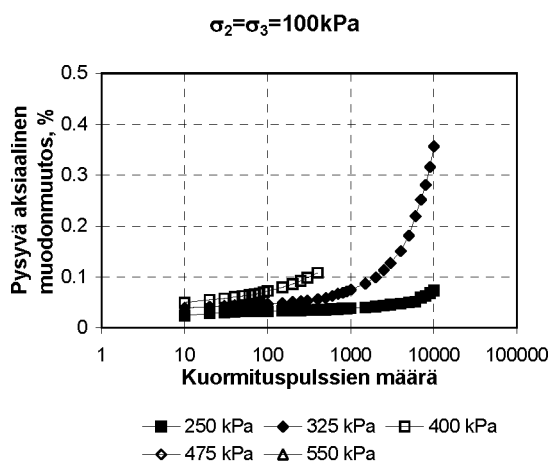
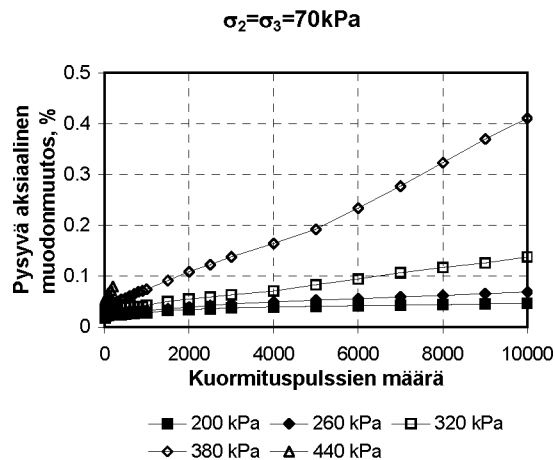
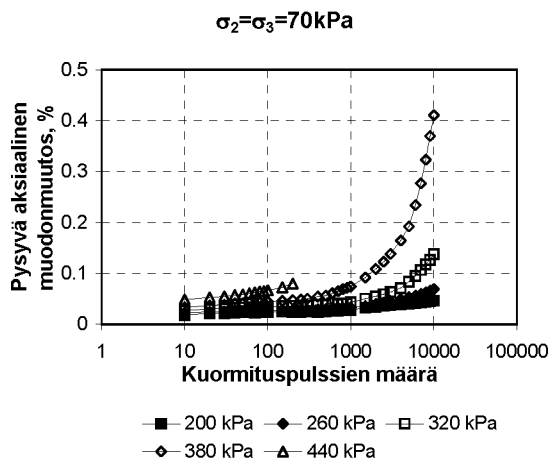
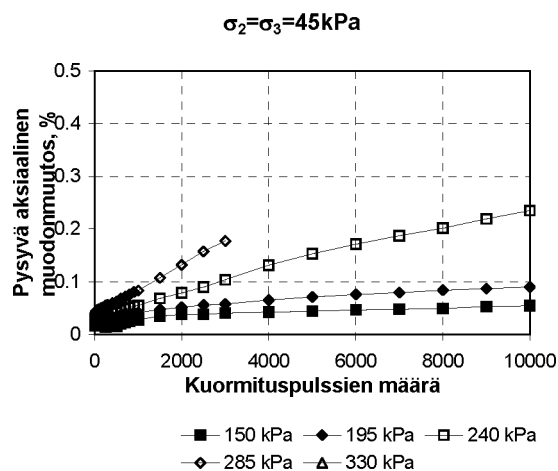
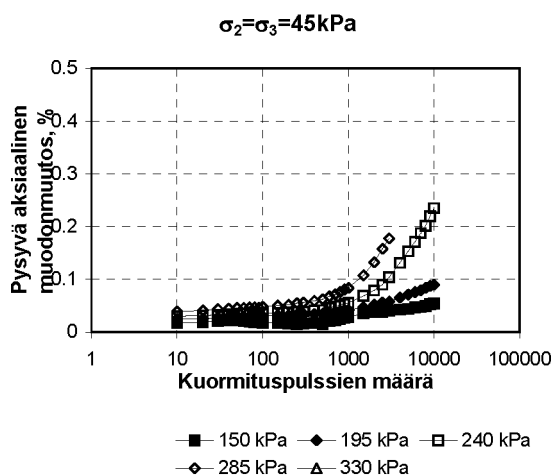


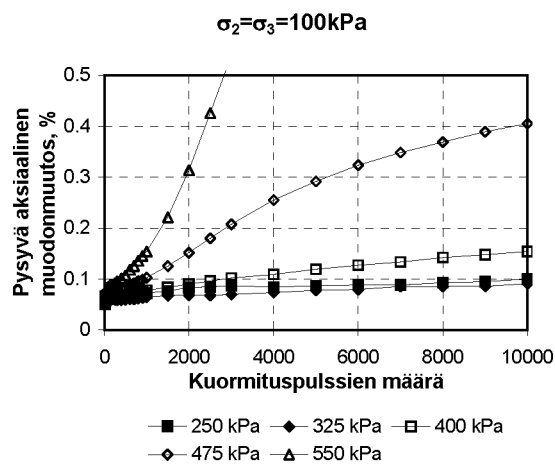
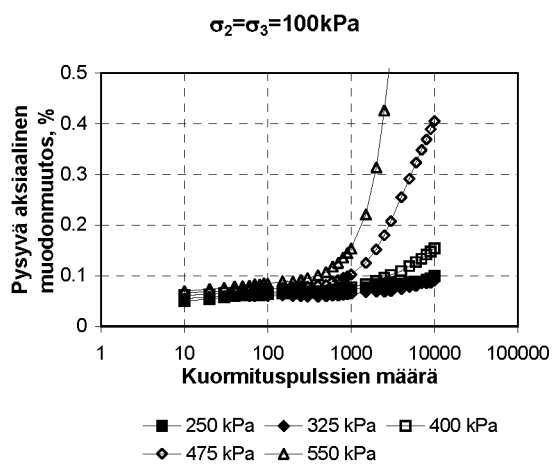
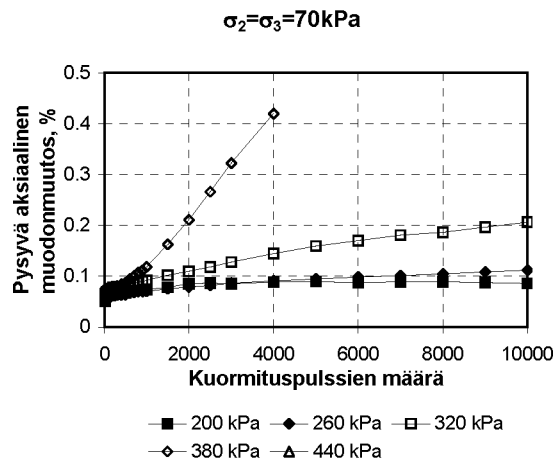
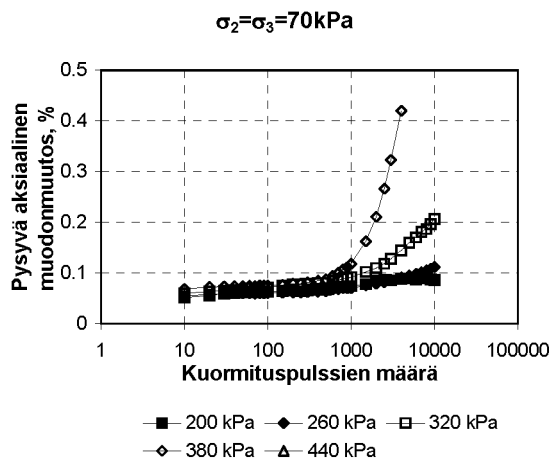
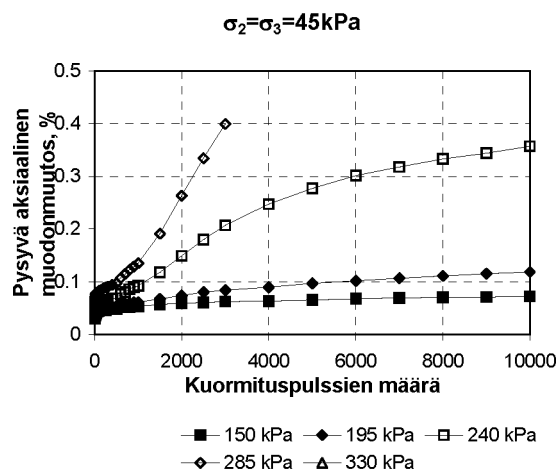
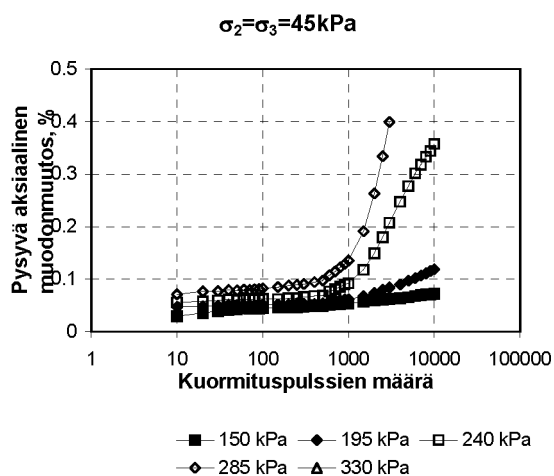


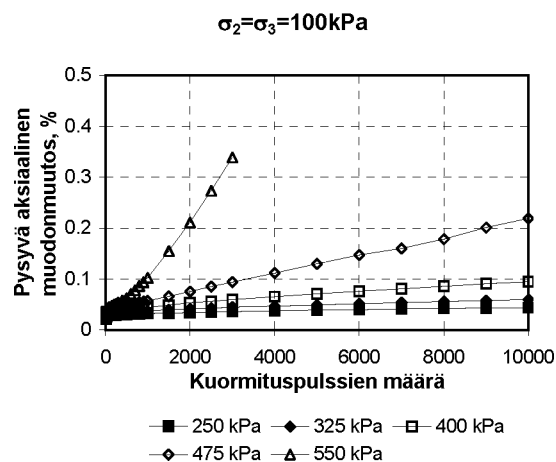
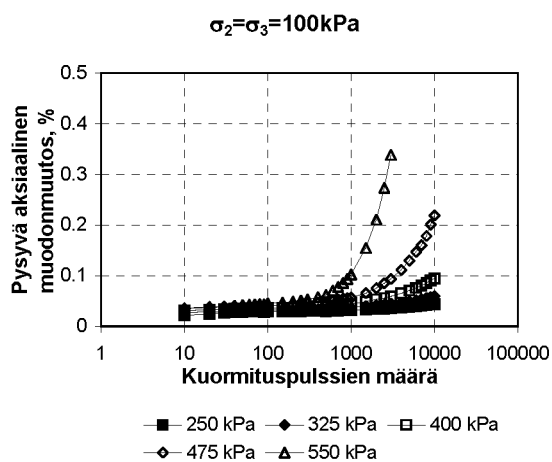
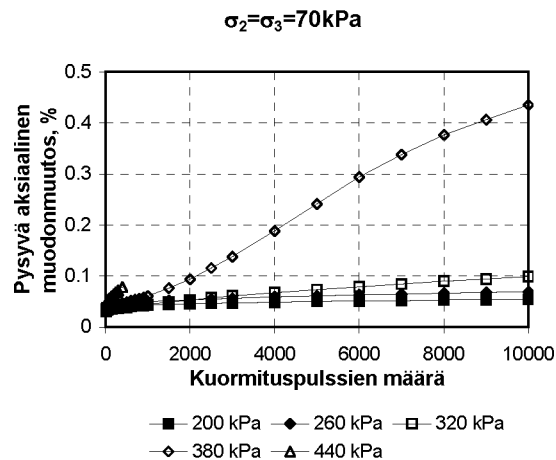
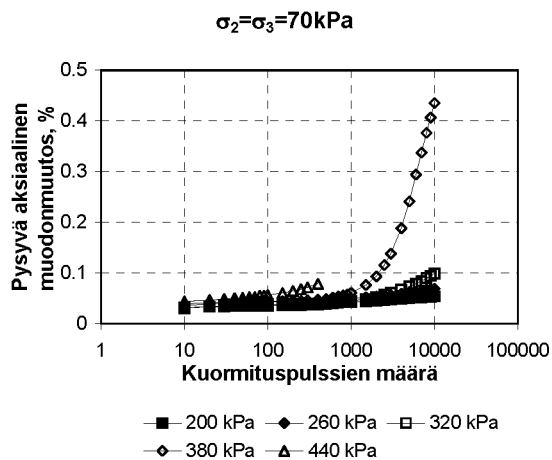
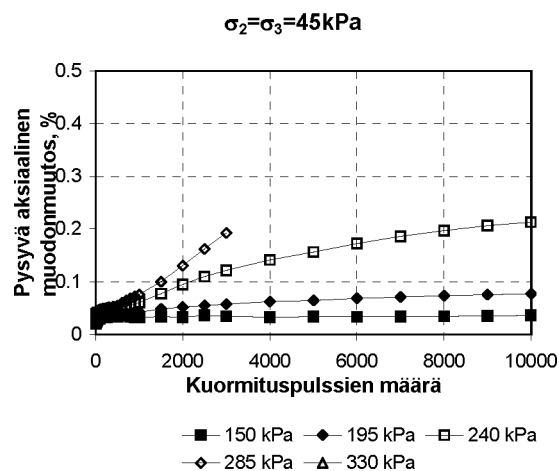
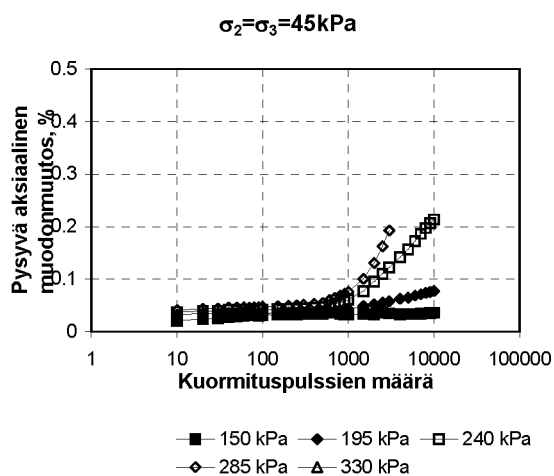


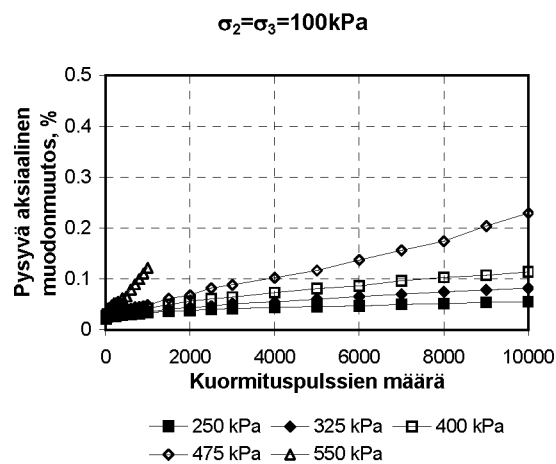
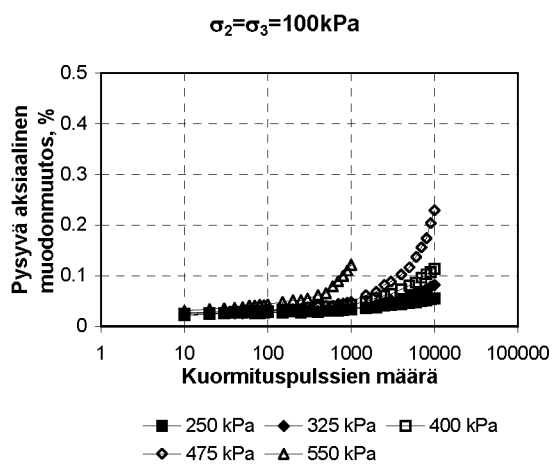
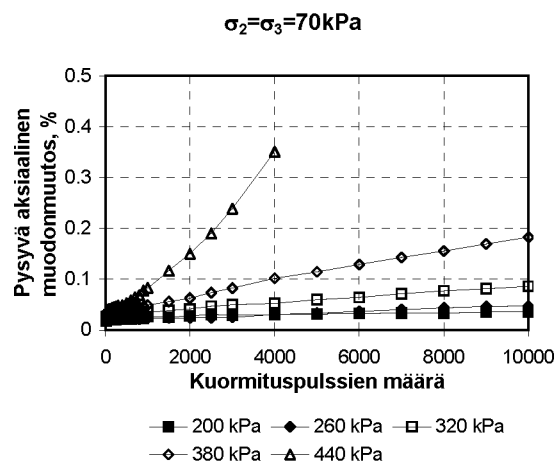
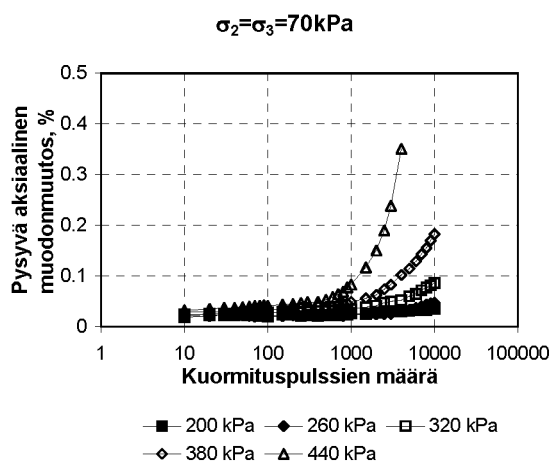
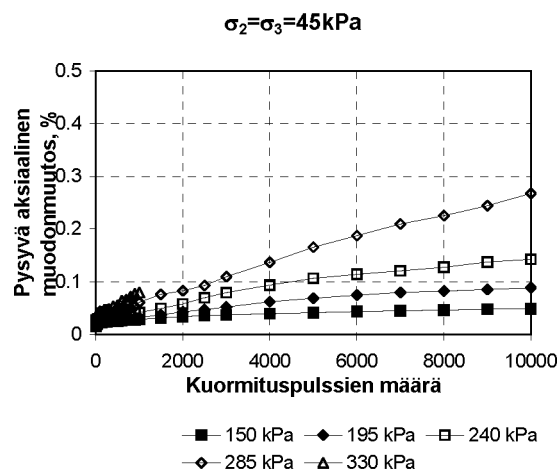
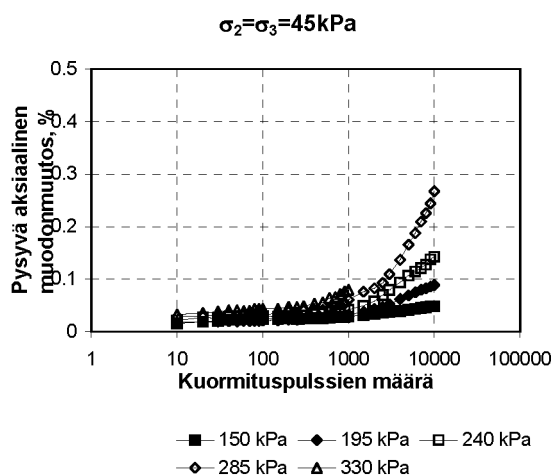


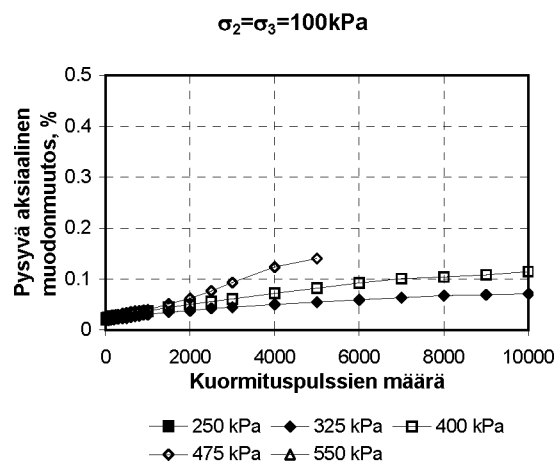
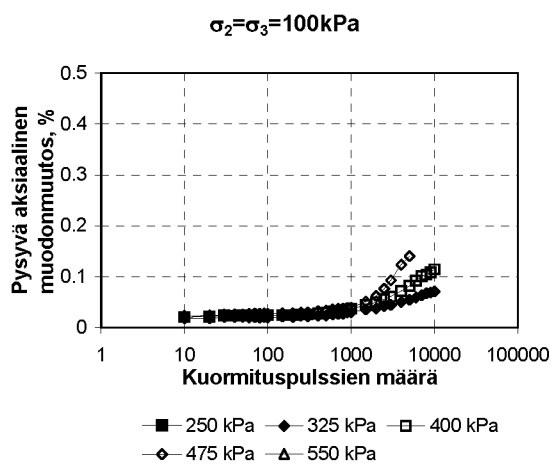
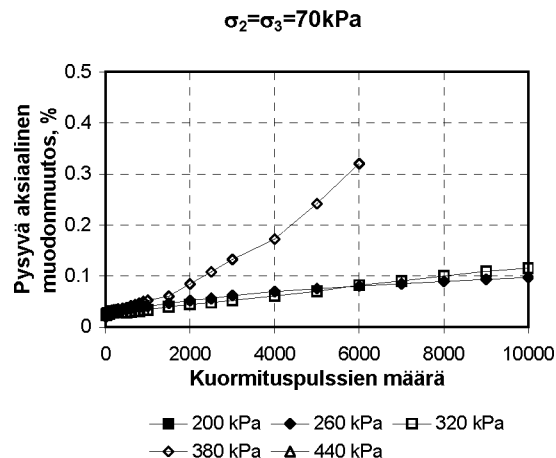
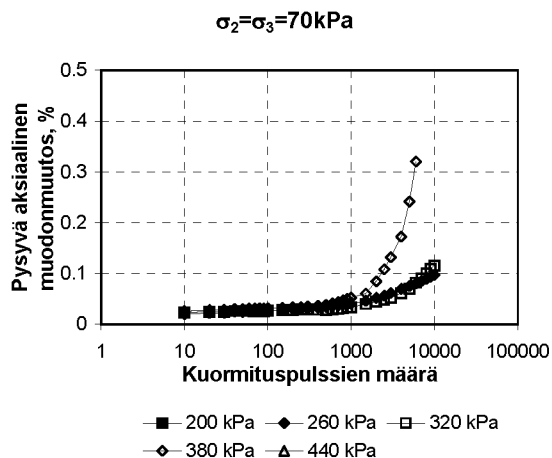
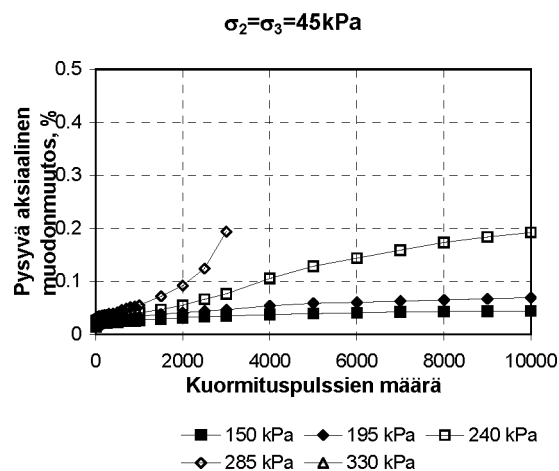
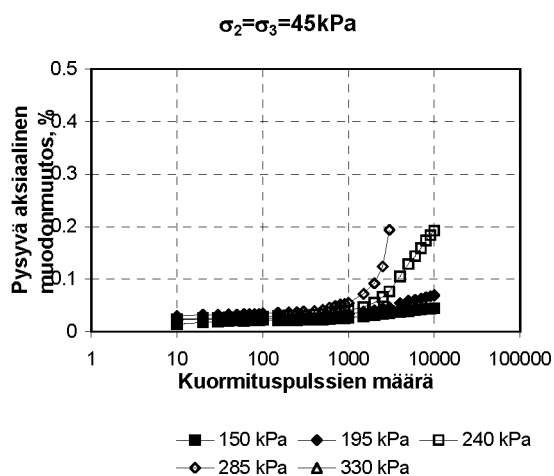


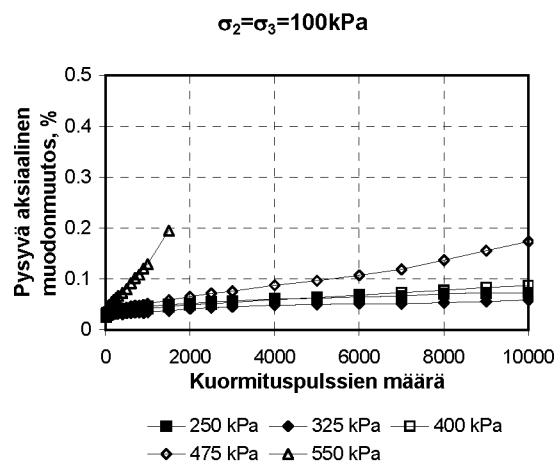
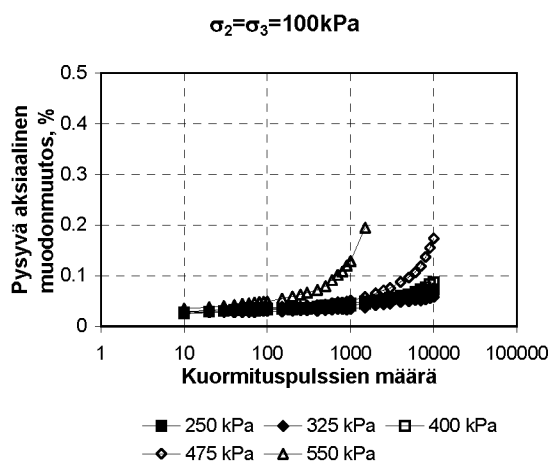
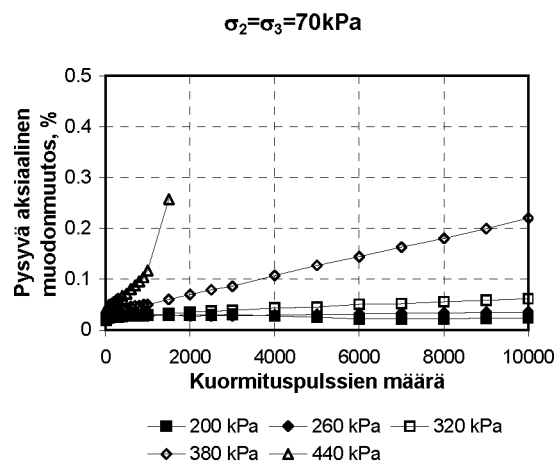
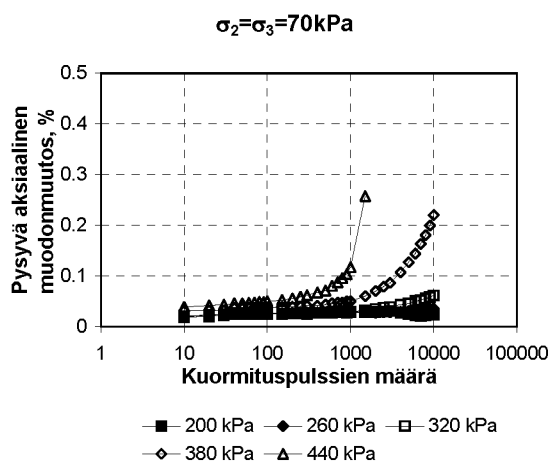
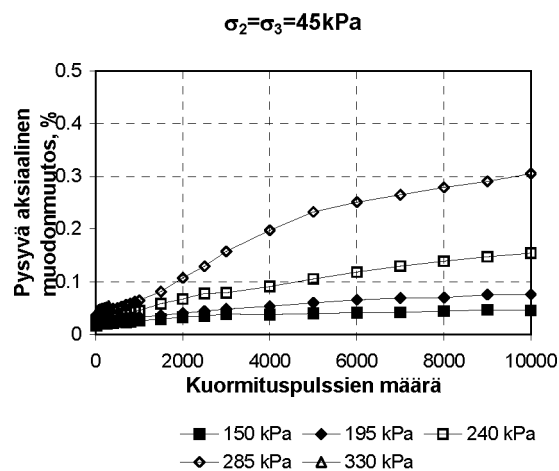
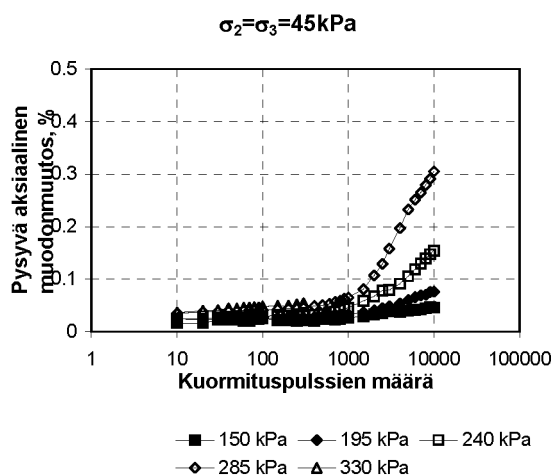


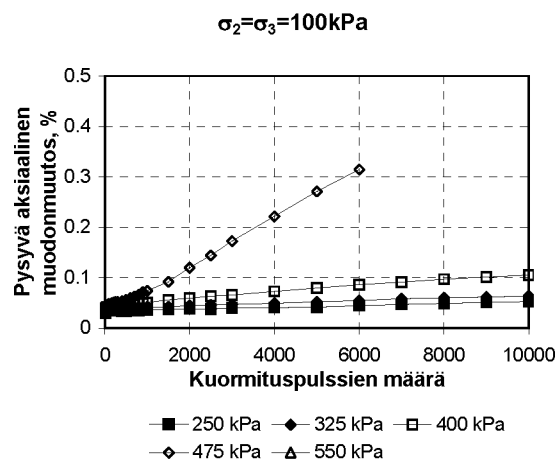
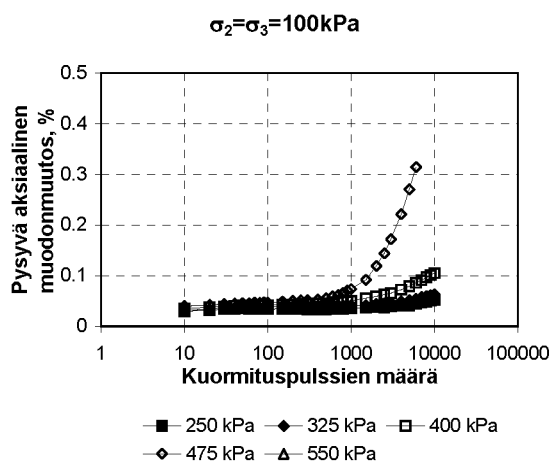
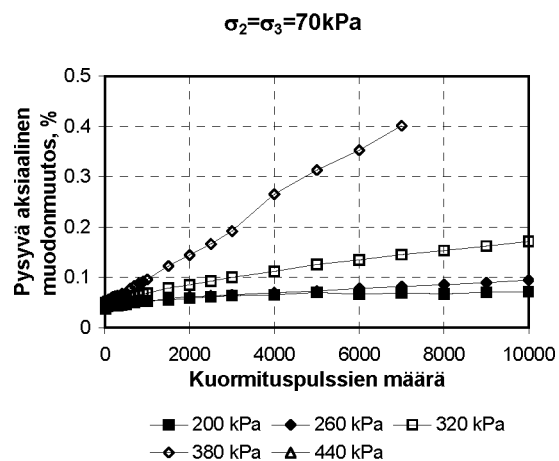
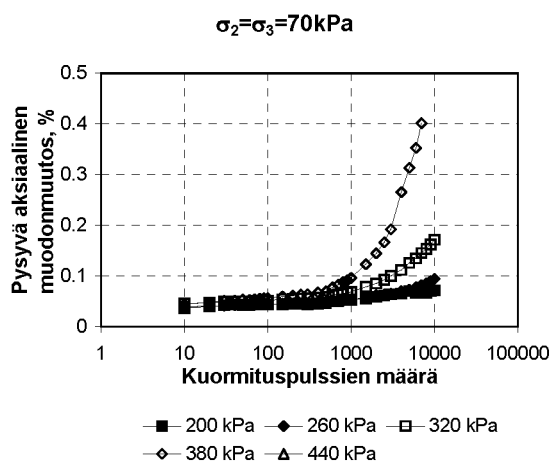
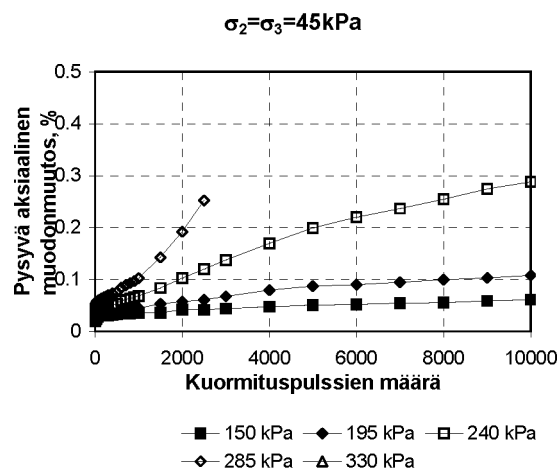
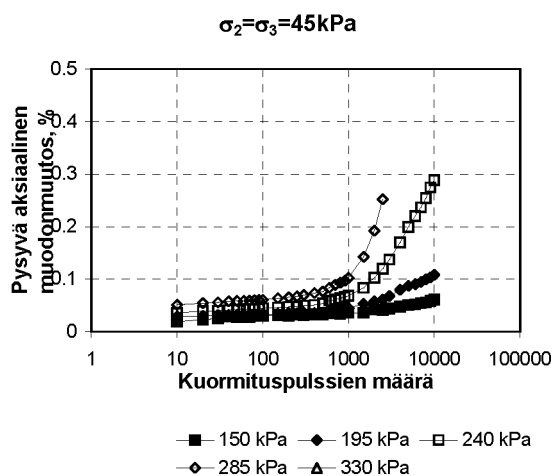


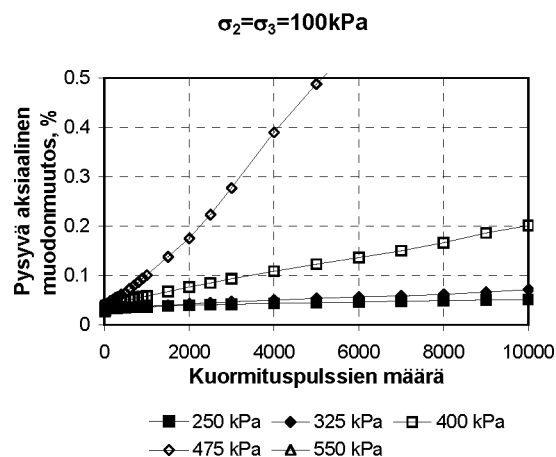
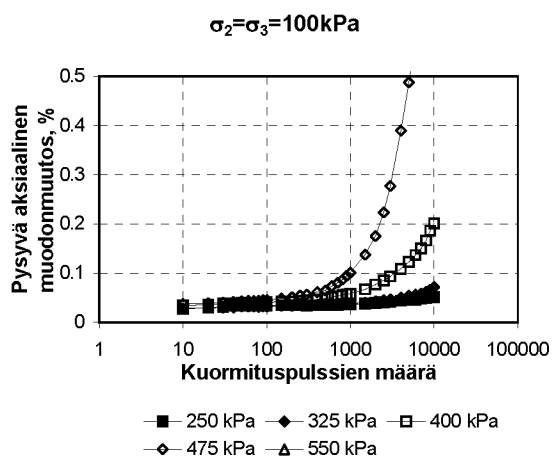
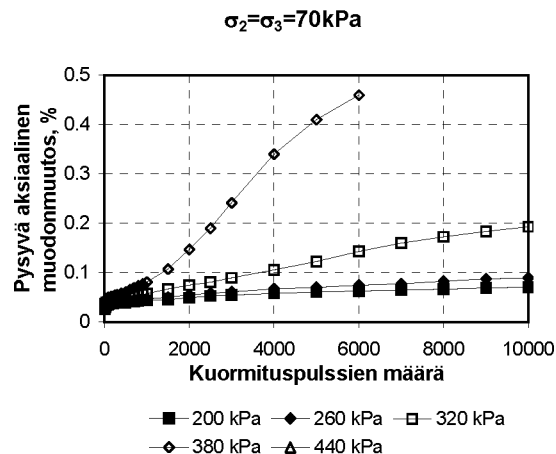
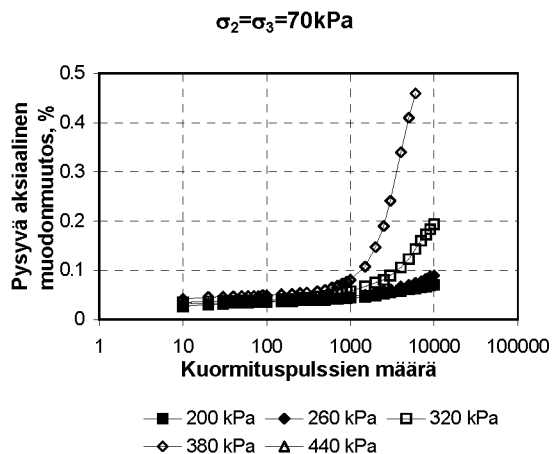
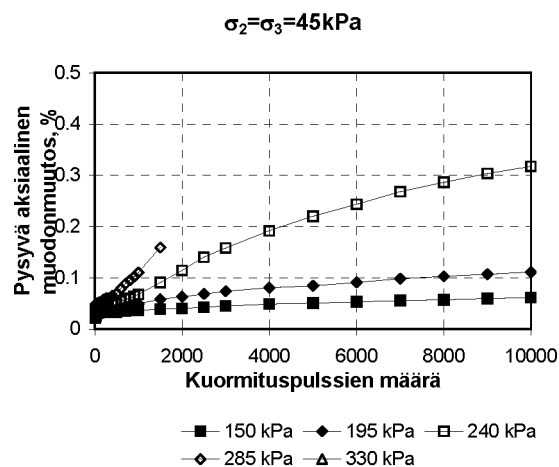
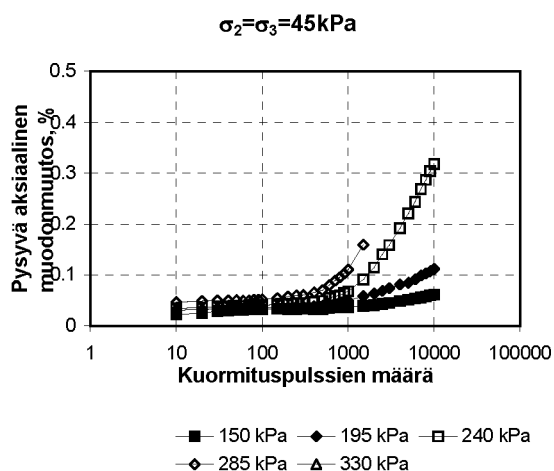


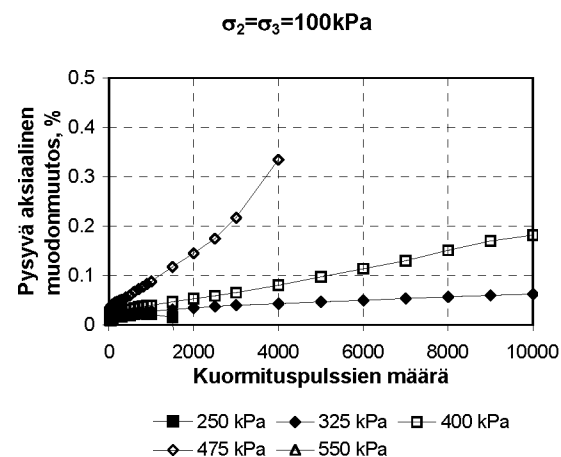
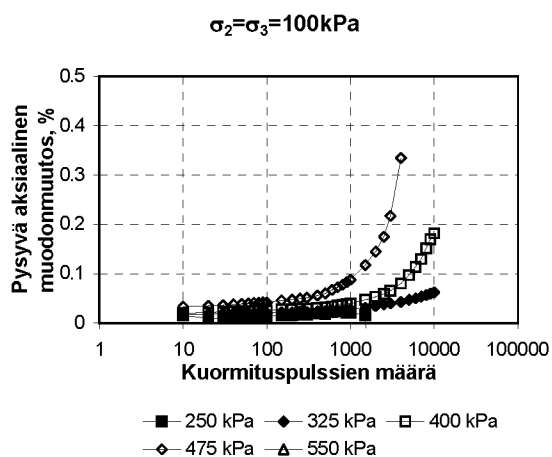
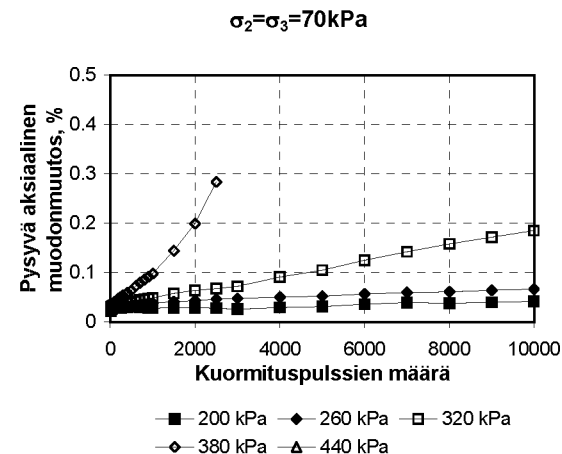
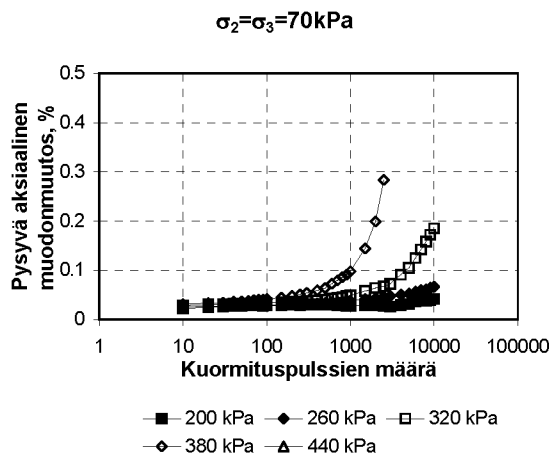
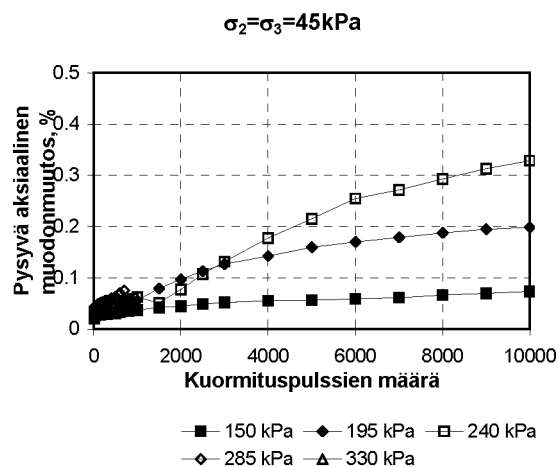
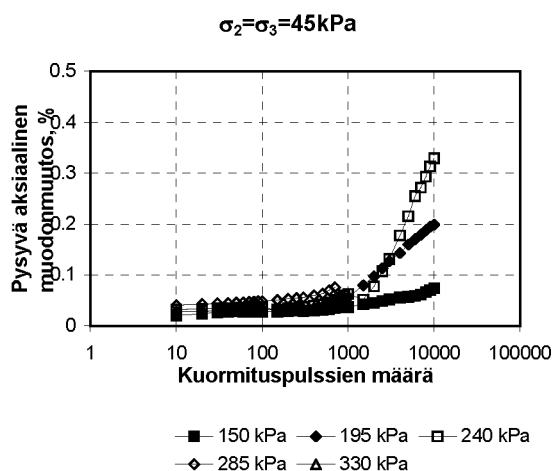












Liik
enne
vira
sto

ISSN-L 1798-6656

ISSN 1798-6664

ISBN 978-952-255-525-0

www.liikennevirasto.fi